

Schlussbericht vom 31.07.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20373 N

Thema

Ermittlung und Parametrisierung der Hohlraumverteilung in Asphaltprobekörpern mit asphaltpetrologischen Methoden

Berichtszeitraum

01.02.2019 – 31.01.2022

Forschungsvereinigung

Deutsches Asphaltinstitut (DAI) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehrswegebau

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	6
1.1	Zielsetzung.....	8
1.2	Arbeitspaket 1.1: Erprobung und Verfahrensstabilisierung – Präparationstechniken..	8
1.3	Arbeitspaket 1.2: Scanverfahren.....	8
1.4	Arbeitspaket 2: Identifikation der relevanten Hohlraummerkmale	8
1.5	Arbeitspaket 3: Entwicklung eines Algorithmus zur Hohlraumerkennung und -analyse	8
1.6	Arbeitspaket 4: Dokumentation und Berichtslegung.....	9
2	Ergebnisse.....	10
2.1	Arbeitspaket 1.1	10
2.2	Trennen der Probe.....	10
2.2.1	Verfüllen der Hohlräume	11
2.2.2	Schleifen	17
2.2.3	Schlussfolgerung.....	18
2.2.4	Gegenüberstellung der geleisteten Arbeiten mit den Projektzielen.....	19
2.3	Arbeitspaket 1.2.....	20
2.3.1	Scanner mit Kaltlichtröhre	20
2.3.2	Scanner mit LEDs	20
2.3.3	Schlussfolgerung.....	21
2.3.4	Gegenüberstellung der geleisteten Arbeiten mit den Projektzielen.....	22
2.4	Arbeitspaket 2.....	22
2.4.1	Auswahl der Parameter	23
2.4.2	Hohlraumgehalt.....	24
2.4.3	Hohlraumverteilung	24
2.4.4	Hohlraumgröße	26
2.4.5	Gegenüberstellung der geleisteten Arbeiten mit den Projektzielen.....	26
2.5	Arbeitspaket 3.....	26
2.5.1	Identifikation der Hohlräume.....	27
2.5.2	Anwendbarkeit des Verfahrens.....	34
2.5.3	Weiterverarbeitung der Daten.....	39
2.5.4	Validierung der Methode anhand von Forschungsprojekten	46
2.5.5	Schlussfolgerung.....	55
2.5.6	Gegenüberstellung der geleisteten Arbeiten mit den Projektzielen.....	55
3	Verwendung der Zuwendung	55
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	56
5	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse.....	56
6	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	56
7	Quellenverzeichnis	59
8	Anhang	60
8.1	Präparationsanleitung.....	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hohlraumverteilung von vier fiktiven Probekörpern mit gleichem Hohlraumgehalt	6
Abbildung 2: Gegenüberstellung der Schnittbilder einer konventionellen Steintrennmaschine und einer Präzisionssteintrennmaschine	11
Abbildung 3: Asphaltanschliff mit Gipsverfüllung; mit Pfeilen gekennzeichnet: Gipsschleier auf Gesteinskörnung	12
Abbildung 4: Anschliff eines offenporigen Asphalts, mit pigmentierten Gips verfüllt	12
Abbildung 5: Ausbluten von Bitumen aufgrund zu hoher Hitzeentwicklung beim Aushärten....	13
Abbildung 6: Anschliff einer halbstarren Deckschicht, Hohlräume mit rot pigmentiertem Epoxy 1000 verfüllt (Breite des Bildausschnittes = 2 cm).....	14
Abbildung 7: Anfärbung des Epoxidharzes mit weißer Farbpaste, die roten Pfeile markieren bräunliche Verfärbungen, die auf eine Bitumenanlösung hindeuten.....	15
Abbildung 8: Gegenüberstellung zweier Farbpigmentierungen; links: Fluoreszierendes, pulverförmiges Pigment, rechts: gelbe Farbpaste	15
Abbildung 9: links: Beispiel einer Einbettungsform aus Bucheinbindefolie, rechts: Imprägnieren des Probekörpers in der Vakuumkammer.....	16
Abbildung 10: Rotationsschleifmaschine mit profilierter Schleifscheibe	17
Abbildung 11: Platinendesign zum Umbau des LED-Scanners auf UV-LEDs.....	21
Abbildung 12: UV-Scan mit Kaltlichtröhrenscanner	21
Abbildung 13: UV-Scan mit LED-Scanner	21
Abbildung 14: Anwendungsfenster der Software JMicroVision mit eingelesenem Anschliff.....	27
Abbildung 15: Dialog zum Einstellen der Kalibrierung	28
Abbildung 16: Anschliff mit festgelegtem Auswertebereich (durchgezogene Linie) und festgelegter Profillinie (gestrichelt)	29
Abbildung 17: Eingabemaske des Objekterkennungsalgorithmus	31
Abbildung 18: Einstellen des Thresholds mithilfe der Farbpipette	32
Abbildung 19: Anschliff mit umrandeten Hohlraumobjekten	33
Abbildung 20: Dialogfeld zum Erstellen eines Hohlraumprofils	34
Abbildung 21: links: Anschliffe eines AC 16 BS; rechts: Anschliffe eines AC 32 TS (gelb: Hohlräume)	35
Abbildung 22: Vergleich der Hohlraumgehalte von drei Asphalten	35

Abbildung 23: links: Auswertung AC 16 BS mit einbezogenem Randbereich (rot: Detektierte Hohlräume); rechts: Auswertung AC 16 BS ohne Randbereich (blau: Detektierte Hohlräume) .	36
Abbildung 24: Vergleich der asphaltpetrologisch und konventionell bestimmten Hohlraumgehalte an Walzsektorplatten.....	37
Abbildung 25: Anschliff einer AC 16 BS Walzsektorplatte.....	37
Abbildung 26: Anschliff einer AC 16 BS Walzsektorplatte.....	38
Abbildung 27: Anschliff einer AC 32 TS Walzsektorplatte.....	38
Abbildung 28: Anschliff einer AC 32 TS Walzsektorplatte.....	38
Abbildung 29: Vorgehen der Profilfunktion (Tielmann & Hill, 2018)	40
Abbildung 30: Hohlraumprofile der Anschliffe AC 8 D N, AC 16 B S und AC 32 T S	41
Abbildung 31: Hohlraumtiefenverteilung als aufsummierte Hohlraumfläche in Prozent	42
Abbildung 32: Darstellung der Hohlraumtiefenverteilung als Hohlraumfläche im jeweiligen Tiefenabschnitt für die drei Asphaltbetone.....	43
Abbildung 33: Histogramm einer Hohlraumgrößenverteilung, entnommen aus JMicroVision...	44
Abbildung 34: Hohlraumgrößenverteilung von drei untersuchten Asphaltmischgutsorten	45
Abbildung 35: Hohlraumgrößenverteilung eines AC 16 BS im vorverdichteten und im endverdichteten Zustand	46
Abbildung 36: Bohrkernentnahmestellen der beiden Probeeinbauten. Zusätzlich sind die Mischguttemperatur und für Limburg die Fertigerstillstände gekennzeichnet.....	47
Abbildung 37: Verschiebung der Hohlraumgrößenverteilung zwischen Vor- und Endverdichteter Schicht.....	48
Abbildung 38: Aufsummierte Tiefenverteilung des Hohlraumgehalts für Bad Hersfeld (a und b) und Limburg (c und d) jeweils im vorverdichteten (VV) und endverdichteten (EV) Zustand.....	49
Abbildung 39: Schichtgrenzen verschiedener Ansprühpostionen mit der Emulsionen C40 B5-S50	
Abbildung 40: Schichtgrenzen verschiedener Ansprühpostionen mit der Emulsionen C60 BP4-S	51
Abbildung 41: HEIZ, Probekörper 1.1	52
Abbildung 42: HEIZ, Probekörper 1.2	52
Abbildung 43: HEIZ, Probekörper 1.3	52
Abbildung 44: HEIZ, Probekörper 2.1	52
Abbildung 45: HEIZ, Probekörper 2.2	52
Abbildung 46: HEIZ, Probekörper 2.3	52
Abbildung 47: HEIZ, Probekörper 3.1	52

Abbildung 48: HEIZ, Probekörper 3.2	52
Abbildung 49: HEIZ, Probekörper 4.1	53
Abbildung 50: HEIZ, Probekörper 4.2	53
Abbildung 51: HEIZ, Probekörper 4.3	53
Abbildung 52: HEIZ, Probekörper 5.1	53
Abbildung 53: HEIZ, Probekörper 5.2	53
Abbildung 54: HEIZ, Probekörper 5.3	53
Abbildung 55: HEIZ, Probekörper 6.1	53
Abbildung 56: HEIZ, Probekörper 6.2	53
Abbildung 57: HEIZ, Probekörper 6.3	53

1. Einleitung

Wichtige Kennwerte zur Beurteilung der Einbauqualität einer eingebauten Asphaltsschicht sind Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad. Die volumetrischen Kennwerte von Asphaltprobekörpern, ob aus dem Labor oder Feld, werden nach dem gültigen Regelwerk gemäß TP Asphalt-StB Teil 8 (FGSV, 2012) bestimmt. Die genannten Kennwerte werden aus Raumdichten der Asphaltprobekörper und der Rohdichte des Asphaltmischguts berechnet. Schon die Bestimmungen der Einzelwerte unterliegen gewissen Ungenauigkeiten, die insbesondere bei Proben mit unregelmäßiger Oberfläche und großem Hohlraumgehalt zunehmen. Der größte Nachteil des konventionellen Verfahrens zur Hohlraumbestimmung ist allerdings die begrenzte Aussagekraft über Gestalt, Verteilung und Größe der Hohlräume. Zur Verdeutlichung dieser Problematik ist in der nächsten Abbildung die Hohlraumverteilung von vier fiktiven Probekörpern dargestellt. Alle diese Probekörper würden mit der konventionellen Asphaltbestimmung mit dem gleichen Hohlraumgehalt gekennzeichnet, von dem zugeordneten Asphaltmischgut kann aber ein deutlich unterschiedliches Materialverhalten erwartet werden.

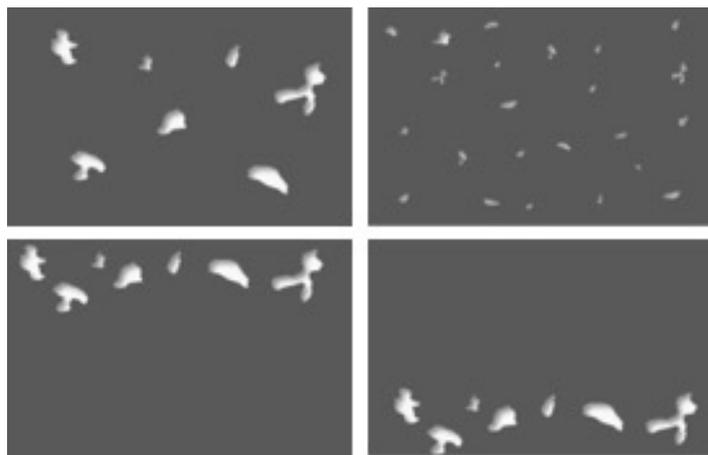


Abbildung 1: Hohlraumverteilung von vier fiktiven Probekörpern mit gleichem Hohlraumgehalt

Es ist zu erwarten, dass Asphalte mit solch verschiedenen Hohlraumgefügen auch unterschiedliche Eigenschaften im Hinblick auf Dauerhaftigkeit, Verformungswiderstand und Gebrauchseigenschaften aufweisen. Zu dieser Erkenntnis sind auch Ma et al. (2016) gekommen. In ihrer Arbeit simulierten sie verschiedene Asphalte mit unterschiedlichen Hohlraumverteilungen mittels der Diskreten-Elemente-Methode (DEM). Ihre Erkenntnisse stützen die hier aufgestellte Hypothese und legen nahe, dass eine gleichmäßige Hohlraumverteilung im Asphalt die größten Lasten aufnehmen kann.

Daher ist es schlüssig, ein angepasstes Analyseverfahren für den Werkstoff Asphalt zu entwickeln, welches es ermöglicht, den Hohlraumgehalt umfassender zu bewerten als mit einem einzelnen Kennwert.

Dazu bieten sich bildanalytische Verfahren an, da sie relativ einfach umzusetzen sind und zusätzlich ohne weitere Materialuntersuchungen bewertet werden können. Für das durchgeführte Forschungsprojekt kamen zwei Verfahren in Betracht. Zum einen die Analyse mittels Computertomographie und zum anderen die Betrachtung von Asphaltanschliffen. Dabei hat jede Methode ihre Vor- und Nachteile, die ausführlich in der Dissertation von Tielmann-Unger (2019) diskutiert werden.

Der große Vorteil der Computertomographie ist, dass sie weitestgehend zerstörungsfrei durchgeführt werden kann. Zudem ist es möglich in bestimmten Geräten auch während der Durchleuchtung Lasten auf die untersuchte Probe aufzubringen. Als Resultat ergibt sich ein dreidimensionales Bild des Probekörpers, aus welchem verschiedene Schnittebenen extrahiert werden können. Die Computertomographie ermöglicht es zudem, die Konnektivität der Hohlräume zu bewerten. Nachteilig bei dieser Methode sind die hohen Anschaffungskosten der Geräte, die nur von Fachpersonal betrieben werden können. Günstigere Geräte können nur kleine Proben untersuchen und liefern eine relativ schlechte Auflösung für Kleinst Hohlräume.

Die Anschliffanalyse besticht hingegen durch Einfachheit des Verfahrens. Für den Anwender können mit geringen Investitionen die Möglichkeiten der Anschliffpräparation geschaffen werden. Zudem ist die Technik leicht zu erlernen und mit etwas Übung können schnell qualitativ hochwertige Anschliffe hergestellt werden. Nachteilig bei der Methode ist, dass je nach Asphaltmischgut eine größere Anzahl von Proben untersucht werden muss, um zuverlässige Kennwerte zu erlangen. Die Konnektivität der Hohlräume kann nicht bewertet werden.

Aus dem angestellten Vergleich der beiden Verfahren hat sich die Anschliffanalyse als geeigneter für die Anwendung bei KMUs erwiesen.

1.1 Zielsetzung

Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, eine Methode zu entwickeln, die es ermöglicht mit geringem Aufwand eine möglichst präzise Darstellung des Hohlraumgefüges zu erhalten. Zum Erreichen dieses Projektziels wurden insgesamt vier Arbeitspakete entwickelt, die zu einer Methode führen sollen, die es KMUs ermöglicht ihre Asphalte hinsichtlich des Hohlraumgefüges zu optimieren und eigene Probleme im Einbauprozess zu erkennen und abzustellen. Im Folgenden sind die Ziele der Arbeitspakete kurz zusammengefasst.

1.2 Arbeitspaket 1.1: Erprobung und Verfahrensstabilisierung – Präparationstechniken

Ziel des Arbeitspaketes 1.1 ist es, eine prozesssichere Methode zur Präparation hochwertiger Asphaltanschliffe zu entwickeln. Wichtig ist hierbei, dass die besonderen Eigenschaften des Werkstoffs Asphalt, insbesondere die Temperaturempfindlichkeit und die unterschiedlichen Baustoffe in der Mischung, zu berücksichtigen. Die Präparationsschritte müssen so gewählt werden, dass das ursprüngliche Hohlraumgefüge nicht verändert oder gestört wird. Um die Anwendbarkeit des Verfahrens zu überprüfen ist es nötig, Anschliffe an verschiedenartigen Probekörpern und Asphaltmischgutsorten anzuwenden und zu bewerten.

1.3 Arbeitspaket 1.2: Scanverfahren

Die präparierten Anschliffe sollen bildanalytisch ausgewertet werden. Dazu ist es nötig ein digitales, hochauflösendes Bild ohne Verzerrungen zu erzeugen. Hierzu haben sich Fotokameras als wenig geeignet gezeigt, da diese zu Verzerrungen im Randbereich des Bildes neigen. Außerdem kommt es beim Einsatz von UV-Licht zu Reflexionen, die fluoreszierende Hohlräume überstrahlen. Um dies zu vermeiden, sollen Flachbettscanner so konstruiert werden, dass diese unter UV-Wellenlänge arbeiten.

1.4 Arbeitspaket 2: Identifikation der relevanten Hohlraummerkmale

In diesem Arbeitspaket soll herausgearbeitet werden, welche der Hohlraumeigenschaften zur Charakterisierung des Hohlraumgefüges geeignet sind.

1.5 Arbeitspaket 3: Entwicklung eines Algorithmus zur Hohlraumerkennung und -analyse

Die Scans der Anschliffe werden digital ausgewertet und bewertet. Dies erfolgt mittels des Einsatzes von Objekterkennungsalgorithmen, die mithilfe von Farbschwellwerten Pixel einer bestimmten Kategorie zuordnen können und zusammenhängende Pixel einer Kategorie zu einem

Objekt zusammenfassen. Die so detektieren Hohlräume sollen dann auf bestimmte Kennwerte wie z. B. die Größe, Form oder Orientierung untersucht werden können.

1.6 Arbeitspaket 4: Dokumentation und Berichtslegung

Die im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse werden innerhalb des hier vorliegenden Berichts zusammengefasst. Der Anhang 8.1 enthält eine Präparationsanleitung anhand derer auch bisher nicht geschulte Laien eine Anschliffpräparation durchführen können.

2 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse nach Arbeitspaketen aufgeschlüsselt präsentiert.

2.1 Arbeitspaket 1.1

Die prozesssichere Präparation von Asphaltanschliffen erfordert zunächst die genaue Beschreibung des fertigen Produkts. Als perfekter Anschliff kann eine Probe bewertet werden, bei der das Hohlraumgefüge des Asphaltes ungestört aufgetrennt und an der Schnittfläche vollständig mit dem gewählten Füllmaterial ausgefüllt wurde. Die Anschlifffläche soll plan eben und frei von jeglichem Überstand des Verfüllmaterials sein. Um dieses Ziel mit möglichst geringem Aufwand und reproduzierbar zu erreichen, wurden im genannten Arbeitspaket alle Präparationsschritte analysiert und optimiert. Die einzelnen Erkenntnisse werden im Folgenden dargestellt.

2.2 Trennen der Probe

Bereits vor Projektbeginn wurde eine umfassende Untersuchung zur Eignung verschiedener Gesteinstrennmaschinen für die Herstellung von Asphaltanschliffen durchgeführt. Herkömmliche Sägen mit einer Asphalttrennscheibe neigen dazu, beim Schneiden zu hohe Temperaturen zu erzeugen. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Bitumens werden kleine Hohlräume zugeschmiert und können im Anschluss nicht mehr detektiert werden. Die Segmentation der Sägeblätter kann zu einer Zertrümmerung der Körner in der Probe führen. Ein weiterer Nachteil ist das Führen der Probe von Hand. Insbesondere bei nicht quaderförmigen Proben entstehen schnell Riefen auf der Schnittfläche, die sich bei der späteren Präparation nachteilig auswirken. Ein Vergleich der Schnittbilder zweier Trennmaschinen ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Unterschiede sind deutlich zu erkennen. Diese Voruntersuchungen haben ergeben, dass eine möglichst saubere Trennung der Asphaltproben nur mit der Präzisionstrennmaschine erreicht wird.

Konventionelle Steintrennmaschine



Bindemittel ist verschmiert, Sägerillen und Kornaufrau-
hung an einem 35 mm breiten Ausschnitt eines Asphalt-
probekörpers

Präzisionstrennmaschine



wenig gestörtes Schnittbild an einem 35 mm breiten
Ausschnitt eines Asphaltprobekörpers



Nahaufnahme (7,4 x 3,7 mm) mit sichtbaren Verschmierungen und Kornaufrauungen



Nahaufnahme (7,4 x 3,7 mm) mit sehr geringen Verschmierungen und Kornaufrauungen

Abbildung 2: Gegenüberstellung der Schnittbilder einer konventionellen Steintrennmaschine und einer Präzisionssteintrennmaschine

Um den Aufwand der weiteren Präparationsschritte möglichst gering zu halten, sollte bereits beim Trennen eine möglichst große Ebenheit erzielt werden. Zu diesem Zweck wurden Vortriebsgeschwindigkeit und Schnittrichtung variiert und deren Einfluss auf das Schnittbild untersucht. Die verwendete Präzisionssäge verfügt über einen automatischen Vortrieb des Sägetisches und des Sägeblatts. Bei der Vortriebsgeschwindigkeit muss ein Optimum bezüglich Dauer und Schnittbild gefunden werden. Damit letzteres nicht negativ beeinflusst wird, muss genügend Zeit zur Kühlung des Sägeblatts und zum Abtransport des Schneidabriebs zur Verfügung stehen. In der Praxis hat sich eine Geschwindigkeit zwischen 0,8 und 1 mm/s als optimal erwiesen. Ob der Schnitt in Y-Richtung (Horizontaler Schnitt durch Verfahren des Sägetisches) oder in Z-Richtung (Vertikaler Schnitt durch Verfahren des Sägeblatts) erfolgt, spielt für das Schnittbild dagegen keine Rolle. Die Wahl hängt von der Geometrie des Probekörpers ab. Bei großen Proben ist ein Diagonalschnitt erforderlich, um sie vollständig zu trennen.

2.2.1 Verfüllen der Hohlräume

Das Verfüllmaterial für die Hohlräume muss mehreren Anforderungen gerecht werden. Das Material muss gut zu verarbeiten sein und einen guten Farbkontrast zum Werkstoff Asphalt bieten. Dabei darf es das Bitumen nicht lösen, um die Struktur der Probe nicht zu zerstören. Es sollte zudem kostengünstig sein und für eine möglichst schnelle Weiterverarbeitung sorgen. Aus der Literaturrecherche ergibt sich, dass Gips oder verschiedene Epoxidharze geeignet sein könnten.

2.2.1.1 Gips

Der Einsatz von Gips bietet viele Vorteile. Als Verfüllmaterial ist er sehr kostengünstig und nahezu überall erhältlich. Das Einbringen von Gips in einen Asphaltanschliff erfolgt im „flüssigen“ Zustand. Dabei muss darauf geachtet werden, dass dieser nicht zu zäh ist, um beim Abziehen nicht wieder aus den Hohlräumen gerissen zu werden. Nach der kurzen Aushärtezeit bietet der weiße

Gips einen klaren Kontrast zum umliegenden Asphalt. (siehe Abbildung 3) Gleichwohl ist zu erkennen, dass auch beim gründlichen Abziehen des Materials von der Oberfläche ein feiner weißer Schleier auf den Gesteinskörnern verbleibt, der auch im Nachhinein nicht abgeschliffen werden kann. Somit kann es bei der digitalen Auswertung zu Fehlbestimmungen und einer Überinterpretation des Hohlraumgehalts kommen. Das Verfüllen von Kleinsthohlräumen und Rissen mit Gips gestaltet sich schwierig, da er aufgrund der Viskosität und der eigenen Körnigkeit nur schwer eindringen kann.

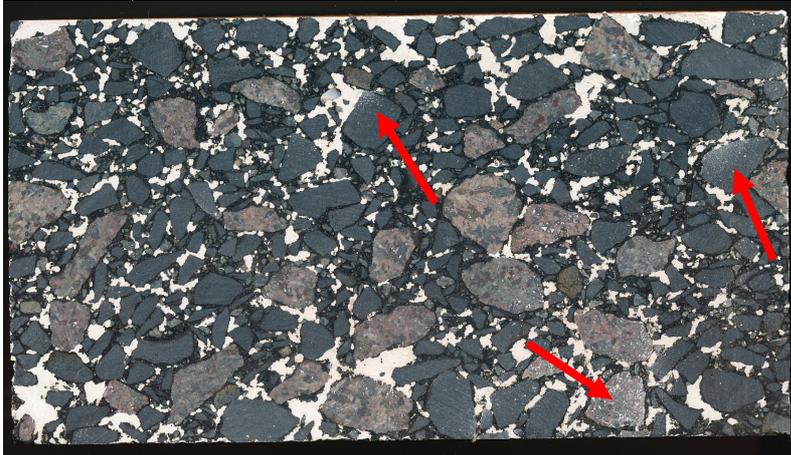


Abbildung 3: Asphaltanschliff mit Gipsverfüllung; mit Pfeilen gekennzeichnet: Gipsschleier auf Gesteinskörnung

Ein weiterer Nachteil von Gips ist, dass die Anfärbung mittels Farbpigmenten nur schwer möglich ist (Abbildung 4). Bei der Verwendung von ausschließlich dunkler Gesteinskörnung ist dies kein Problem. Kommen jedoch helle Körnungen wie Granit oder Quarzit zum Einsatz, kann leicht eine Fehlbestimmung von Hohlräumen geschehen. In Abbildung 4 wurde ein offenporiger Asphalt mit Gips präpariert. Hier ergibt sich ein chaotischer Gesamteindruck, der auch die qualitative Interpretation des Probekörpers erschwert.

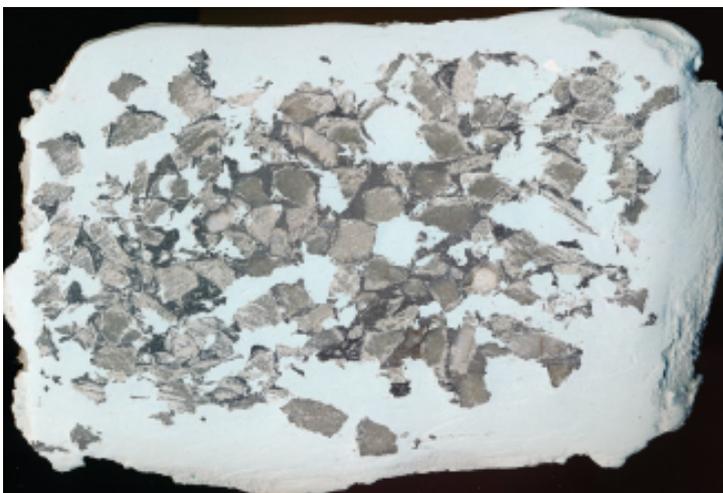


Abbildung 4: Anschliff eines offenporigen Asphalts, mit pigmentierten Gips verfüllt

Abschließend lässt sich aus den Probeanschliffen mit Gips zusammenfassen, dass dieses Verfüllmaterial für präzise Auswertungen und die allgemeine Anwendung auf alle Asphaltmischgutsorten nicht geeignet ist.

2.2.1.2 Epoxidharze

Epoxidharze eignen sich zum Verfüllen von Hohlräumen, da sie im flüssigen Zustand niedrigviskos und im ausgehärteten Zustand sehr hart sind. Zudem gehen sie eine feste Bindung mit dem zu verfüllenden Werkstoff ein. Aus diesem Grund liegt es nahe auch für die Präparation von Asphaltanschliffen auf diesen Werkstoff zurückzugreifen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass viele der Epoxidharze beim Aushärten hohe Temperaturen entwickeln können, die das Asphaltgefüge schädigen können. Ein Beispiel ist in Abbildung 5 dargestellt. Nach dem Aushärten des Harzsystems kommt es zu einem „Ausbluten“ von Bitumen entlang der Harz-Asphalt-Kontakte.



Abbildung 5: Ausbluten von Bitumen aufgrund zu hoher Hitzeentwicklung beim Aushärten

Dementsprechend muss ein Epoxidharz gefunden werden, welches relativ kalt aushärtet, dabei aber relativ schnell weiterverarbeitet werden kann. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden drei verschiedene Epoxidharzsysteme auf ihre Eignung geprüft. Die Eigenschaften werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 1: Eigenschaften der getesteten Epoxidharzsysteme

	Epoxy 1000	CEM 9000	Epoxy Wasserklar
Farbe nach Aushärten	farblos	weiß	farblos
Verarbeitungszeit	20 Minuten	4-6 Minuten	5 Stunden
Aushärtezeit	6-8 Stunden	15-25 Minuten	24-48 Stunden
Viskosität	niedrig	niedrig	niedrig
Aushärtetemperatur	niedrig	80 °C	niedrig
Preis	ca. 128 €/kg	ca. 21 €/kg	ca. 34 €/kg



Abbildung 6: Anschliff einer halbstarren Deckschicht, Hohlräume mit rot pigmentiertem Epoxy 1000 verfüllt (Breite des Bildausschnittes = 2 cm)

Nach Betrachtung aller Kennwerte scheinen sowohl Epoxy 1000 und Epoxy Wasserklar als geeignet. Tests an zahlreichen Probekörpern haben aber aufgrund der langen Aushärtezeit zum Ausschluss von Epoxy Wasserklar geführt. Weiterhin traten Probleme mit der Abdeckfolie der Einbettungsform auf, die mit dem Harz verklebt. Somit hat sich Epoxy 1000 von der Fa. Cloeren Technology als Standardeinbettmittel für Asphaltanschliffe durchgesetzt. Damit können kontrastreich pigmentierte, scharf abgegrenzte Anschliffe hergestellt werden. Aufgrund der geringen Viskosität können auch kleinste Hohlräume verfüllt werden (Abbildung 6).

2.2.1.3 Pigmentierung

Das eingesetzte Epoxidharz ist nach dem Aushärten farblos und wäre in diesem Zustand zur bildanalytischen Auswertung ungeeignet. Daher wurden im Rahmen des Forschungsprojektes verschiedene Möglichkeiten der Farbgebung geprüft. Es kamen sowohl pulverförmige Farbpigmente, als auch vorgefertigte Farbpasten für Epoxidharze zum Einsatz. Pigmente können relativ preisgünstig in nahezu jeder Farbe beschafft werden. Auch fluoreszierende Pigmente sind erhältlich. Die Auswahl an Farbpasten ist etwas geringer, dafür sind diese leichter in die Harz-Härter-

Mischung des Epoxidsystems einzurühren und es entsteht keine Verklumpung wie bei Pigmentpulvern. Die geprüften Farbpasten hatten jedoch den entscheidenden Nachteil, dass sie die Viskosität des Epoxidharzes deutlich erhöhten, sodass Kleinsthohlräume nicht zufriedenstellend verfüllt wurden. Wie in Abbildung 7 zu erkennen wurde außerdem das Bindemittel angelöst.



Abbildung 7: Anfärbung des Epoxidharzes mit weißer Farbpaste, die roten Pfeile markieren bräunliche Verfärbungen, die auf eine Bitumenanlösung hindeuten

Als am besten geeignet zeigen sich fluoreszierende, pulverförmige Pigmente, die mit einem Anteil von etwa 3-4 M.-% in das Epoxidharz eingerührt werden. Die angeregte Fluoreszenz bei der Bildaufnahme erzeugt einen sehr starken Kontrast, der sich günstig auf die anschließende Auswertung auswirkt. In Abbildung 8 werden beide Pigmentierungen gegenübergestellt. Das Gelb der Farbpaste auf der rechten Seite zeigt zwar einen guten Kontrast zum Asphalt, jedoch ist dieser noch deutlich geringer als der, den das fluoreszierende Pigment auf der linken Seite liefert.

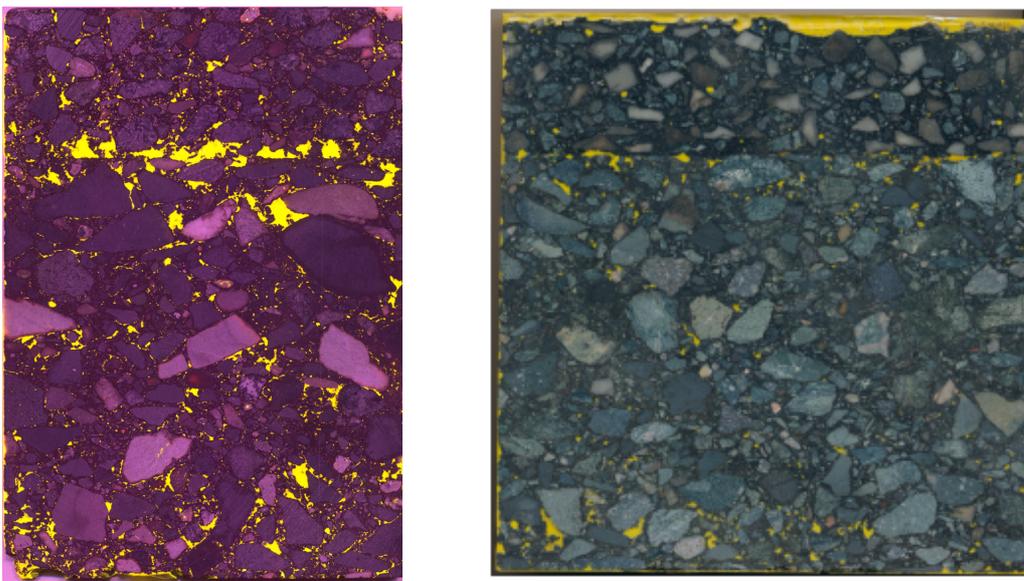


Abbildung 8: Gegenüberstellung zweier Farbpigmentierungen; links: Fluoreszierendes, pulverförmiges Pigment, rechts: gelbe Farbpaste

2.2.1.4 Imprägnieren

Zum Imprägnieren der Asphaltsschnitte muss eine geeignete Einbettungsform erstellt werden, die das Epoxidharz am Abfließen hindert und nach dem Aushärten wieder rückstandsfrei entfernt werden kann. Die Abdichtung darf nicht so erfolgen, dass Material von außen in die Hohlräume eindringt und eine Verfüllung verhindert. Im Handel sind professionelle Einbettungsformen aus Silikon erhältlich. Diese haben den Vorteil, dass sie sich gut vom Epoxidharz lösen lassen, dicht sind und wiederverwendet werden können. Die Anwendung für die Präparation von Asphaltanschliffen ist jedoch wenig geeignet, da die bearbeiteten Probekörper nur selten gleichförmig sind, sondern von großen Bohrkernen bis zu kleinen Laborproben reichen können. Auch sind die Ausmaße eines Anschnitts von einem Bohrkern je nach Schnittebene unterschiedlich. Somit war es nötig eine Form zu entwickeln, die anpassungsfähig ist und bei jeder Geometrie funktioniert.

Am einfachsten umzusetzen hat sich eine Form aus Bucheinbindefolie erwiesen, die möglichst dicht um den Probekörper geklebt wird. Eine zusätzliche Abdichtung kann mit Isolierband erzeugt werden, welches möglichst eng anliegend die Folie an die Probe drückt (Abbildung 9). Diese Lösung ist kostengünstig, einfach anzuwenden und zu erlernen. Die Abdichtung ist jedoch für unregelmäßige Randflächen der Probekörper noch weiter zu verbessern.

Schließlich wird der abgedichtete Probekörper mit dem Epoxidharz verfüllt und in die Vakuumkammer (Abbildung 9) gelegt. Unter Vakuum wird die durch den Einfüllprozess eingebrachte Luft aus dem Probekörper extrahiert, sodass sichergestellt werden kann, dass alle für die Analyse relevanten Hohlräume mit Epoxidharz verfüllt sind.



Abbildung 9: links: Beispiel einer Einbettungsform aus Bucheinbindefolie, rechts: Imprägnieren des Probekörpers in der Vakuumkammer

Um den Schleifaufwand zu reduzieren, wird im Anschluss eine dünne Folie auf die Oberfläche aufgeschichtet um den verbleibenden Überstand des Imprägniermittels zu reduzieren.

2.2.2 Schleifen

Der letzte Schritt der Anschliffpräparation ist das Abschleifen des Harzüberstandes, bis eine ebene Oberfläche entsteht, bei der lediglich die Hohlräume mit Epoxidharz verfüllt sind. Im Forschungsprojekt wurden zwei verschiedene Typen von Schleifmaschinen getestet. Ein Vibrationstisch, der eine weitestgehend automatische Bearbeitung der Proben zulässt und einen Rotationsschleifteller, auf dem die Probe manuell geschliffen wird.

Das Vibrationsgerät hat sich für die Bearbeitung der Asphaltanschliffe als weniger geeignet herausgestellt. Es sind lange Schleifphasen mit der Schleifkörnung einer Größe nötig, bevor auf die nächst kleinere Körnung gewechselt werden kann. Der Schleifprozess kann so mehrere Tage in Anspruch nehmen. Zudem setzen sich kleine Partikel der SiC-Schleifkörnung in das Bitumen, so dass wesentliche Merkmale des Asphaltgefüges verdeckt werden.

Der Rotationsschleifteller (Abbildung 10) hingegen bietet gute Eigenschaften, um relativ schnell eine ebene Oberfläche zu erhalten. Geschliffen wird grundsätzlich mit kaltem Leitungswasser, welches für den Abtransport des Schleifguts sowie zur Kühlung dient. Zum Einsatz kommen zwei Typen von Schleifscheiben. Für den Vorschleif werden unprofilierte Scheiben verwendet, die einen schnellen Materialabtrag begünstigen, jedoch zu Kratzern auf der Oberfläche führen können, wenn der Abraum nicht schnell genug abgeführt werden kann. Daher erfolgt der Feinschliff mit profilierten Scheiben, bei denen zwischen den einzelnen Diamantpads genug Platz ist um abgeschliffene Partikel wegzuspülen.

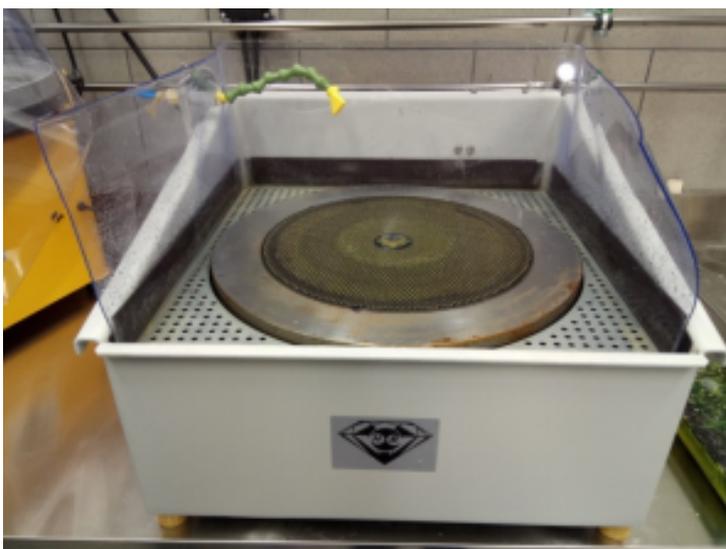


Abbildung 10: Rotationsschleifmaschine mit profilierter Schleifscheibe

Danach ist die Präparation des Anschliffs abgeschlossen und dieser kann zur asphaltpetrologischen Auswertung weiterverwendet werden.

2.2.3 Schlussfolgerung

Aus den durchgeführten Untersuchungen an verschiedenen Probekörpern konnte ermittelt werden, dass die angestrebte Methode zur Hohlraumcharakterisierung von Asphalten an allen Asphaltmischgutsorten und Probekörperarten umsetzbar ist. Im Folgenden wird auf Besonderheiten bei Präparation und Auswertung eingegangen.

2.2.3.1 Trennen

Beim Trennen der Probekörper zeigen insbesondere bindemittelarme, grobkörnige Tragschichten das Problem von Kornausbrüchen. Durch die hohe Drehzahl des Sägeblatts wird das Spülwasser mit großem Druck durch Hohlräume gepresst und kann schwach eingebundene Körner aus dem Verbund reißen. Hier ist die Dicke des Probekörpers so zu wählen, dass ein Ausbruch nur auf der nicht ausgewerteten Rückseite entsteht. Asphaltmischgutsorten mit kleinen, nicht konnektiven Hohlräumen zeigen diese Problematik nicht, hier ist jedoch die Gefahr des Verschmierens des Bitumens größer, sodass Kleinst Hohlräume ggf. nicht mehr zu erkennen sind. Dem kann mit einer langsameren Vorschubgeschwindigkeit entgegengewirkt werden.

Wie zuvor gezeigt können Anschliffe auch auf Basis von Schnitten mit einer handelsüblichen Steintrennmaschine hergestellt werden, wie sie in jedem Labor vorhanden ist. Hierbei ist auf ausreichende Kühlung, am besten durch Frischwasser, zu achten und die Probe sehr langsam zu sägen. Es muss dabei jedoch in Kauf genommen werden, dass möglicherweise ein Teil der Hohlräume verschmiert wird und die Hohlraumgehalte 1-2 % niedriger bestimmt werden, als mit der konventionellen Methode.

Imprägnieren

Asphaltmischgutsorten mit großen Hohlraumgehalten, z. B. offenporige Asphalte, oder grobkörnige Trag- und Binderschichten bieten den Vorteil, dass Hohlräume leicht mit Epoxidharz zu verfüllen sind. Demgegenüber steht der Effekt des Absackens von Verfüllmaterial. Dadurch, dass die Form teilweise nicht eng genug am Probekörper anliegen kann, kann Harz an den Boden der Form absacken. Auch ungleichmäßige Ränder, die das Anliegen der Folie behindern, führen dazu, dass Harz an den Proberändern nach unten abfließen kann. Beide Effekte sorgen dafür, dass zur Präparation eine deutlich höhere Menge an Epoxidharz verwendet werden muss, als bei dichtem und feinkörnigem Asphaltmischgut. Außerdem sind i.d.R. mehr Entlüftungszyklen in der Vakuumkammer notwendig als bei feinkörnigem Asphaltmischgut. Falls nach dem Aushärten des

Epoxidharzes einzelne Hohlräume nicht vollständig verfüllt wurden, können einzelne Hohlräume mit einer Spritze und Kanüle aufgefüllt werden.

Schleifen

Generell gilt es zu beachten, dass bei zu großem Anpressdruck Bindemittelverschmierungen auf der Oberfläche auftreten können. Diese können mit leichtem Druck wieder entfernt werden. Sollte das Bindemittel insgesamt niedrig viskos sein, kann ein Probekörper zuvor auf – 15 °C abgekühlt werden.

2.2.3.2 Auswertung

Kleinst Hohlräume

Aufgrund des Präparations- und Auswerteverfahrens ist es schwierig Hohlräume in der Größenklasse von 0,01 bis 0,1 mm zu detektieren, insbesondere wenn die Probe von großen Hohlräumen dominiert wird. Hohlräume der genannten Größe enthalten nur sehr wenig Harz, die Farb-, bzw. Leuchtintensität ist gering und führt zu einem geringen Farbkontrast zum sichtbaren Lichtbereich des UV-Scanners.

Kleinst Hohlräume haben jedoch nur einen sehr geringen Anteil am gesamten Hohlraumvolumen und spielen für die Asphalteeigenschaften eine marginale Rolle. Der Effekt sollte betrachtet, aber nicht überbewertet werden.

2.2.3.3 Überinterpretation von großen Hohlräumen

Große Hohlräume zeigen sich in der Bildanalyse dominanter als dies ihrem tatsächlichen Volumen entspricht. Dies hängt mit ihrer, aufgrund der großen Harzmenge, starken Leuchtkraft zusammen. Bei der Einstellung des Schwellwertes muss beachtet werden, dass nicht zu blasser Farbtöne zur Klasse der Hohlräume zugeordnet werden.

2.2.3.4 Randeffekte

Probekörper, bei denen während der Präparation große Harzüberstände an den Rändern entstanden sind, neigen dazu im oberen halben Zentimeter überbelichtet zu werden. Dies liegt an der großen Leuchtkraft des überstehenden Epoxidharzes. Innerhalb dieses Bereichs ist es gelegentlich schwieriger die Hohlraumobjekte zweifelsfrei zu identifizieren.

2.2.4 Gegenüberstellung der geleisteten Arbeiten mit den Projektzielen

Ziel dieses Arbeitspakets war es, ein geeignetes Verfahren zu entwickeln, mit dem eine prozesssichere Herstellung von Asphaltanschliffen für die bildanalytische Hohlraumauswertung von Asphaltproben ermöglicht wird. Im Laufe des Projekts konnte das favorisierte Verfahren entwickelt, umfangreich erprobt und angewendet werden. Mögliche Komplikationen wurden bewertet und in die Weiterentwicklung des Verfahrens eingebracht. Somit ist es am Ende des Projekts möglich,

ein Verfahren zu präsentieren, welches schnell von KMUs erlernt und in deren Laboren umgesetzt werden kann. Die nötigen Arbeitsschritte zur Präparation sind mit geringem Schulungsaufwand zu erlernen.

Besonderheiten, die aufgrund der verschiedenen Mikrostrukturen auftreten, wurden beleuchtet und dokumentiert. An verschiedenen Probekörpergeometrien konnte belegt werden, dass die entwickelte Methode zum Formenbau geeignet ist, nahezu jede erdenkbare Form abzubilden.

Wird keine Präzisionstrennmaschine verwendet, werden die Hohlraumgehalte unterschätzt.

2.3 Arbeitspaket 1.2

Voruntersuchungen haben ergeben, dass die Bildaufnahme mittels Flachbettscanner die bestgeeignete Methode für die asphaltpetrologische Auswertung von Anschliffen ist. Eine Marktanalyse hat ergeben, dass es keine entsprechenden Produkte gibt, mit denen die Aufnahme von großflächigen Proben mittels UV-Licht möglich ist. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Forschungsprojekts zwei handelsübliche Flachbettscanner zu UV-Scannern umgebaut.

Problematisch war hierbei, dass neuere Scannermodelle häufig über lediglich eine High-Power-LED verfügen, mit denen ein Beleuchtungsbalken erhellt wird. Die Lichtausbeute bei UV-LEDs ist jedoch deutlich schlechter als die von LEDs sichtbaren Lichtbereich. Würde hier eine UV-LED mit ausreichend Leuchtkraft eingesetzt werden, so wäre ein großes Maß an Kühlung erforderlich, das so im Gehäuse nicht umsetzbar ist. Daher wurde auf zwei ältere Scannermodelle zurückgegriffen.

2.3.1 Scanner mit Kaltlichtröhre

Die Beleuchtung im ersten Scanner erfolgte werksseitig mittels einer Kaltlichtröhre. Diese bietet Vorteile für den Umbau zum UV-Scanner, da solche Röhren auch mit UV-Wellenlänge verfügbar sind. Der Umbau erfolgte also lediglich durch Austausch der Kaltlichtröhre. Allerdings bietet das Gerät einige Nachteile, die im Folgenden kurz erläutert werden. Zunächst ist das Alter des Geräts zu nennen. Die Generation von Scannern, die mit Kaltlichtröhren arbeiten, stammt aus der Zeit von Windows 98 – Windows XP. Neuere Treiber für diese Geräte sind nur von Drittanbietern verfügbar und wenig funktional. Zudem ist die Lichtausbeute der Röhren deutlich geringer als die von LEDs, sodass die Scans ein relativ starkes Bildrauschen beinhalten, was bei der Detektion von Kleinsthohlräumen zu Problemen führt (Abbildung 12).

2.3.2 Scanner mit LEDs

Der Umbau des LED-Scanners für die Verwendung von UV-Licht gestaltete sich etwas aufwendiger. Im ersten Arbeitsschritt wurde die Elektronik des Geräts analysiert. Hierzu zählten die

Bauweise der Beleuchtungsplatine, sowie die Spannung der Stromversorgung. Im nächsten Schritt wurden geeignete Widerstände und UV-LEDs ausgewählt. Um diese in die Beleuchtungseinheit des Scanners zu implementieren, wurde mittels AutoCAD ein Platinendesign entwickelt, das eine ausreichende Anzahl an LEDs fassen kann, um die Proben gleichmäßig zu beleuchten (Abbildung 11). Die Abschätzung erfolgte anhand der vom Hersteller genannten Abstrahlwinkel.



Abbildung 11: Platinendesign zum Umbau des LED-Scanners auf UV-LEDs

Die so vorgefertigte Platinenbelegung wurde auf Folie gedruckt und auf einen belichtbaren Rohling übertragen, der im Anschluss freigeätzt wurde. Die so hergestellte Platine konnte daraufhin mit den elektronischen Bauteilen bestückt werden. Nach dem Einbau in den Flachbettscanner konnte dieser im Regelbetrieb verwendet werden.

Die Lichtausbeute der LEDs ist deutlich größer als die der Kaltlichtröhre, wodurch sich deutlich besser abgegrenzte Hohlraum-Asphalt-Kontraste ergeben. Auch das Bildrauschen ist deutlich reduziert. Nachteilig ist der große Anteil an sichtbarem Licht, den die UV-LEDs erzeugen, da so auch eine Beleuchtung des nicht relevanten Anteils der Probe entstehen (Abbildung 13). Hier könnten kurzwellige UV-LEDs Abhilfe schaffen. Diese benötigen jedoch eine stärkere Kühlung, die so nicht umsetzbar ist.

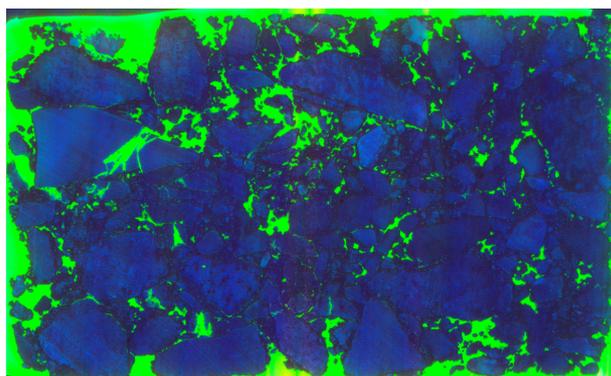


Abbildung 12: UV-Scan mit Kaltlichtröhrenscanner

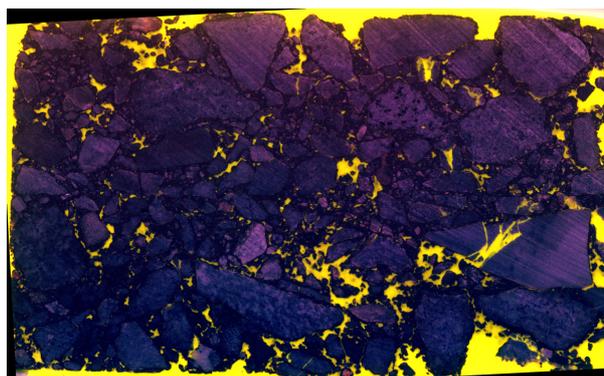


Abbildung 13: UV-Scan mit LED-Scanner

2.3.3 Schlussfolgerung

Durch den Umbau von zwei Flachbettscannern ist es gelungen, UV-Scans der präparierten Anschliffe herzustellen. Die Bildqualität ist ausreichend um Hohlraumgrößen ab etwa $0,05 \text{ mm}^2$ zweifelsfrei zu erkennen. Kleinere Hohlräume sind auch detektierbar, jedoch kann es aufgrund von Bildrauschen hierbei zu Fehlbestimmungen kommen. Der kleinstmögliche Hohlraum bei einer

Auflösung von 1200 dpi hat eine Größe von 0,0047 mm². Eine höhere Auflösung für die Scans wäre realisierbar, hierbei stehen jedoch die Dauer des Scanvorgangs einem geringen Mehrwert an Information gegenüber.

Der Umbau der handelsüblichen Scanner hat jedoch auch Nachteile, die hier ebenfalls aufgeführt werden sollen. Beide Modelle sind älteren Baujahrs, da die Elektronik hier noch relativ einfach zu beherrschen ist und der Umbau in relativ kurzer Zeit stattfinden kann. Hierbei gilt zu beachten, dass die Versorgung mit Treibern in Zukunft schlechter wird und die Geräte möglicherweise nicht mehr zu nutzen sind. Auch ist dieser Umbau nicht von jedem KMU zu bewerkstelligen, da ein gewisses Grundwissen in Elektrotechnik benötigt wird. Ein weiteres Problem ist, dass die Lichtausbeute bei UV-Scans deutlich unter der von normalen Farbscans liegt. Der Scanvorgang muss deswegen in Dunkelheit erfolgen um gute Ergebnisse zu erzielen, da der Bildsensor der Scanner nicht auf diese schwache Beleuchtung ausgelegt ist.

Aufgrund der angesprochenen Schwierigkeiten besteht auf dem Gebiet der Scantechnik weiterer Forschungsbedarf. Es sollte sich ein Hersteller finden, der für die Spezialanwendung der Asphaltpetrologie UV-Scanner entwickelt, mit denen in kurzer Zeit viele Proben in guter Qualität mit UV-Licht gescannt werden können.

2.3.4 Gegenüberstellung der geleisteten Arbeiten mit den Projektzielen

Ziel des Arbeitspaket war es, ein geeignetes Verfahren zur Bildanalyse mittels Flachbettscanner zu entwickeln. Dieses Ziel wurde im Forschungsvorhaben erreicht. Die mit der Methode aus AP 1.1 präparierten Anschliffe können mittels selbst konstruiertem UV-Scanner eingelesen und für die anschließende Auswertung weiterverwendet werden. Eine Optimierung der Scantechnik durch bspw. einen KMU könnte in einem nachfolgenden Forschungsprojekt erfolgen.

2.4 Arbeitspaket 2

In diesem Arbeitspaket soll ermittelt werden, inwieweit sich Änderungen im Einbauprozess oder der Mischgutherstellung in den Hohlraumverhältnissen mittels geeigneter Parameter dokumentieren lassen.

2.4.1 Auswahl der Parameter

Die Auswertung der gescannten Anschliffe erfolgt mit der Software JMicroVision (Roduit, 2020), die im Anschluss an die Objekterkennung eine große Auswahl an Objektparametern zur Verfügung stellt:

- Hohlraumgehalt
- Hohlraumtiefenverteilung
- Hohlraumgröße
- Umfang
- Schwerpunkt eines Objektes in X-Richtung
- Schwerpunkt des Objekts in Y-Richtung
- Orientierung als Winkel zur Horizontalen
- Länge entlang der Orientierung
- Breite 90° zur Orientierung
- Exzentrizität
- Kompaktheit (Umfang/Umfang eines Kreises mit gleicher Fläche)
- Äquivalenter Kreisdurchmesser
- Elongation (Länge/Breite)
- Elliptizität (Fläche einer Ellipse mit gleicher Länge und Breite/Fläche Objekt)
- Rechtwinkligkeit (Fläche eines Rechtecks mit gleicher Länge und Breite/Fläche Objekt)
- Solidität (Fläche Objekt/Fläche konvexe Hülle)
- Konvexität (Umfang Objekt/Umfang konvexe Hülle)

Wie zu erkennen ist, ist eine Vielzahl an Auswertungen der Anschliffe möglich, jedoch sind nicht alle sinnvoll. Ziel des Forschungsprojekts ist es, dass KMUs eine schnelle und gut verständliche Möglichkeit bekommen, ihre Einbauergebnisse zu verbessern, Probleme zu erkennen und abzustellen. Daher ist es wenig zielführend, wissenschaftliche und mathematische Parameter wie beispielsweise die komplexe Hülle einzuführen. Als am einfachsten verständlich wurden im Rahmen des Projekts der Hohlraumgehalt, aber auch die Hohlraumtiefenverteilung und die Hohlraumgröße angesehen. Es ist anzunehmen, dass diese drei Parameter von Mischgutzusammensetzung, Temperatur und Verdichtungsarbeit beeinflusst werden.

2.4.2 Hohlraumgehalt

Die Abhängigkeiten von Hohlraumgehalt zu Asphalteeigenschaften sowie Verdichtung sind in zahlreichen Veröffentlichungen betrachtet worden. Renken (1980) stellte erstmals einen Faktor vor, mit dem die Verdichtbarkeit eines Asphaltmischguts beschrieben werden kann. Er zeigte in seiner Arbeit Abhängigkeiten der nötigen Verdichtungsarbeit und der Zusammensetzung des Asphaltmischguts auf, sodass bereits aus Vorversuchen bestimmt werden kann, wie die Verdichtung auf der Baustelle zu erfolgen hat, um den Zielhohlraumgehalt der Asphaltbefestigung zu erreichen. Eine gute Zusammenstellung aller Einflussfaktoren auf die Asphaltverdichtung stellt der Forschungsbericht von Hughes (1989) dar, aus dem viele Abhängigkeiten entnommen werden können. Grundsätzlich kann man annehmen, dass bei einer signifikanten Änderung des Hohlraumgehalts bei gleichem Asphaltmischgut die Verdichtungsarbeit den Hohlraumgehalt beeinflusst hat. Waren die Einbaubedingungen genau gleich, dann muss eine Änderung am Asphaltmischgut eingetreten sein.

Die Anwendbarkeit des Prüfverfahrens zur Ermittlung von Hohlraumgehalten überprüfte Tielmann-Unger (2019) in seiner Dissertation. Anhand von simulierten Asphaltprobekörpern konnte so definiert werden, welche Anzahl an Anschliffen abhängig von der Probekörpergröße, des zu erwartenden Hohlraumgehalts und der Hohlraumgrößen zu untersuchen sind, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten. So konnte nachgewiesen werden, dass bei Deckschichten mit geringen Hohlraumgehalten bereits einzelne Anschliffe ausreichen, um den Hohlraumgehalt abzubilden. Zumeist ist ein Untersuchungsaufwand von 2-4 Anschliffen erforderlich.

Anhand der beobachteten Streuungen in den Proben, die im Rahmen des Forschungsprojekts bearbeitet wurden, konnte diese theoretische Überlegung bestätigt werden. Es ist zu erkennen, dass der Streubereich bei hohlraumarmen Asphalten geringer ist, als bei hohlraumreichen.

2.4.3 Hohlraumverteilung

Die Verteilung von Hohlräumen über die Dicke einer Asphaltprobe beeinflusst die Dauerhaftigkeit und das Gebrauchsverhalten einer Asphaltbefestigung. Dabei wirkt sich eine ungleichmäßige Anordnung immer nachteilig auf diese Eigenschaften aus.

Ma et al. (2016) führten anhand von DEM-Simulationen virtuelle mechanische Prüfungen an Asphaltproben durch. Dabei wurden Hohlraumgehalt, Hohlraumgröße und Hohlraumverteilung

variiert. Es konnte gezeigt werden, dass alle drei Faktoren einen großen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Asphalts haben. Als günstigstes Hohlraumgefüge stellte sich eine gleichmäßige Verteilung von kleinen, isolierten Hohlräumen dar, wohingegen große, miteinander verbundene Hohlräume einen ungünstigen Einfluss haben. Bei den verschiedenen Hohlraumverteilungen konnte eine Anreicherung im unteren Bereich als besonders schlecht bewertet werden.

Neben dem schädlichen Einfluss auf die mechanische Belastbarkeit des Asphalts bergen Hohlraumanreicherungen weitere Probleme. So kann es bei einer übermäßig dicht ausgebildeten Oberfläche im Sommer zum Aufsteigen von Bindemittel kommen und die Griffigkeit herabgesetzt werden. Bei einer Asphaltsschicht, die im oberen Bereich offen und im unteren Bereich geschlossen ist, kann eindringendes Oberflächenwasser in geringem Maß abgeleitet werden. Frostschäden im Winter sind die direkte Folge.

Ungleichmäßige Hohlraumverteilungen in Asphalten können aufgrund verschiedener Einflussfaktoren entstehen. Als vielleicht wichtigster Faktor ist die Temperatur des Asphaltmischguts zu nennen. Diese sollte über die gesamte Dauer des Verdichtungsvorgangs möglichst gleichmäßig über die gesamte Asphaltsschicht verteilt sein, was insbesondere bei schlechten Witterungsverhältnissen schwierig sein kann. Ist die Unterlage kalt, kühlt auch die Asphaltsschicht an der Unterseite schnell aus, sodass möglicherweise keine ausreichende Verdichtungsleistung mehr erzielt werden kann. Die gesamte Verdichtungsenergie der Walze wirkt dann nur noch auf die oberen Zentimeter der Schicht, die möglicherweise überverdichtet wird und mit Kornzertrümmerung reagieren kann. Starker Wind während des Einbaus hingegen kann zu einer schnellen Abkühlung der Oberfläche führen, was eine Hohlraumanreicherung an der Oberseite der Asphaltsschicht zur Folge hat. Einen Einfluss auf die Temperatur hat auch das Einbaugerät. Wird beispielsweise zu viel Walzwasser auf die Oberfläche aufgebracht, so kann auch hier eine zu schnelle Abkühlung erfolgen.

Wird Asphaltgranulat bei der Asphaltmischgutherstellung nicht ausreichend erhitzt und eingemischt, so kann es als „Klumpen“ in der eingebauten Schicht auftreten. Die Hohlraumverteilung innerhalb dieser Bereiche kann vollkommen anders sein als in der übrigen Asphaltsschicht.

Zuletzt sind Materialentmischungen im Asphaltmischgut zu nennen, die eine Hohlraumverteilung ungünstig beeinflussen können. Diese treten insbesondere bei grobkörnigen Asphaltmischgütern auf. Es kommt zu Anreicherungen von Grob- oder Feinkorn innerhalb der eingebauten Schicht. In

Bereichen mit hohem Grobkornanteil können die entstandenen Hohlräume nicht im ausreichenden Maß verfüllt werden, sodass deutliche Abweichungen zu einer gleichmäßigen Verteilung entstehen können.

2.4.4 Hohlraumgröße

Der Untersuchungsparameter der Hohlraumgröße ist in der Literatur weitestgehend unbeleuchtet geblieben, da eine Bestimmung bisher nur schwer möglich war.

Dabei wird ein Zusammenhang der Hohlraumgröße mit der Korngrößenverteilung und dem Bindemittelgehalt des Asphaltmischguts erwartet. Ein gut abgestufter, leicht verdichtbarer Asphaltbeton ist so konzipiert, dass möglichst jeder Hohlraum zwischen einer Korngröße durch die nächst kleinere Korngröße ausgefüllt werden kann. Somit sollten sich im endverdichteten Zustand nur noch kleine, fein verteilte Hohlräume in der Asphaltbefestigung befinden. Ein Splittmastixasphalt hingegen, dessen Funktionsprinzip auf einer Sieblinie mit Ausfallkörnung basiert wird, grundsätzlich größere Hohlräume beinhalten, da diese nur durch Mastix ausgefüllt werden können. Bereiche, die von Körnern eingeschlossen sind, bleiben als größerer Hohlraum bestehen. Die größten Hohlräume sind in grobkörnigen Tragschichten zu erwarten, da sich hier leicht Räume ausbilden können, die von keiner kleineren Gesteinskörnung ausgefüllt werden können. Der Bindemittelgehalt reicht in diesem Fall nicht aus, um große Hohlräume zu verfüllen.

2.4.5 Gegenüberstellung der geleisteten Arbeiten mit den Projektzielen

Ziel des Arbeitspakets war es, geeignete Parameter zu definieren, die im Folgenden zur Beschreibung von Hohlraumstrukturen genutzt werden sollen. Anhand von Literaturrecherche, theoretischen Überlegungen und Rücksprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses konnten die Faktoren Hohlraumgehalt, Hohlraumverteilung und Hohlraumgröße festgelegt werden. Diese werden als sensitiv gegenüber Änderungen im Asphaltmischgut und beim Einbauprozess angesehen.

2.5 Arbeitspaket 3

Arbeitspaket 3 beinhaltet die Entwicklung eines Algorithmus, mit dessen Hilfe die gescannten Probekörper im Hinblick auf die Hohlraumparameter untersucht werden können. Im Laufe des Forschungsprojekts hat sich herauskristallisiert, dass die Software JMicroVision (Roudit, 2020) ein umfassendes Tool zur Anschliffanalyse darstellt. Daher wurde die Auswertung hinsichtlich der

Hohlraumobjekte mit diesem Programm durchgeführt. Die durchgeführten Arbeiten in Arbeitspaket 3 konzentrierten sich in einem ersten Schritt darauf, die Auswertung in der Software zu optimieren und standardisieren, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Im zweiten Schritt wurden Algorithmen entwickelt, mit denen die in Arbeitspaket 2 festgelegten Hohlraumparameter ausgewertet und visualisiert werden können.

2.5.1 Identifikation der Hohlräume

Die Identifikation der Hohlraumobjekte erfolgt mit der Software JMicroVision (Roduit, 2020). Diese ist plattformunabhängig und frei verfügbar. Somit wird gewährleistet, dass auch KMUs die Auswertungen durchführen können. Im Folgenden soll der im Projekt optimierte Arbeitsablauf dokumentiert werden.

2.5.1.1 Einlesen der Bilddatei

Zunächst wird die vom Scanner generierte Bilddatei in das Programm eingelesen. JMicroVision arbeitet grundsätzlich mit gestapelten TIF Dateien, bietet aber selbst einen Konverter, um weitere Bildformate bearbeiten zu können. Wenn das Einlesen der Datei abgeschlossen ist, erscheint das Bild im rechten Bereich des Anwendungsfensters. Im oberen Bereich befindet sich eine Toolbar, über die zentrale Einstellungen des Projekts aufgerufen werden können. Am linken Bildrand werden die einzelnen Hauptfunktionen des Programms ausgewählt (Abbildung 14).

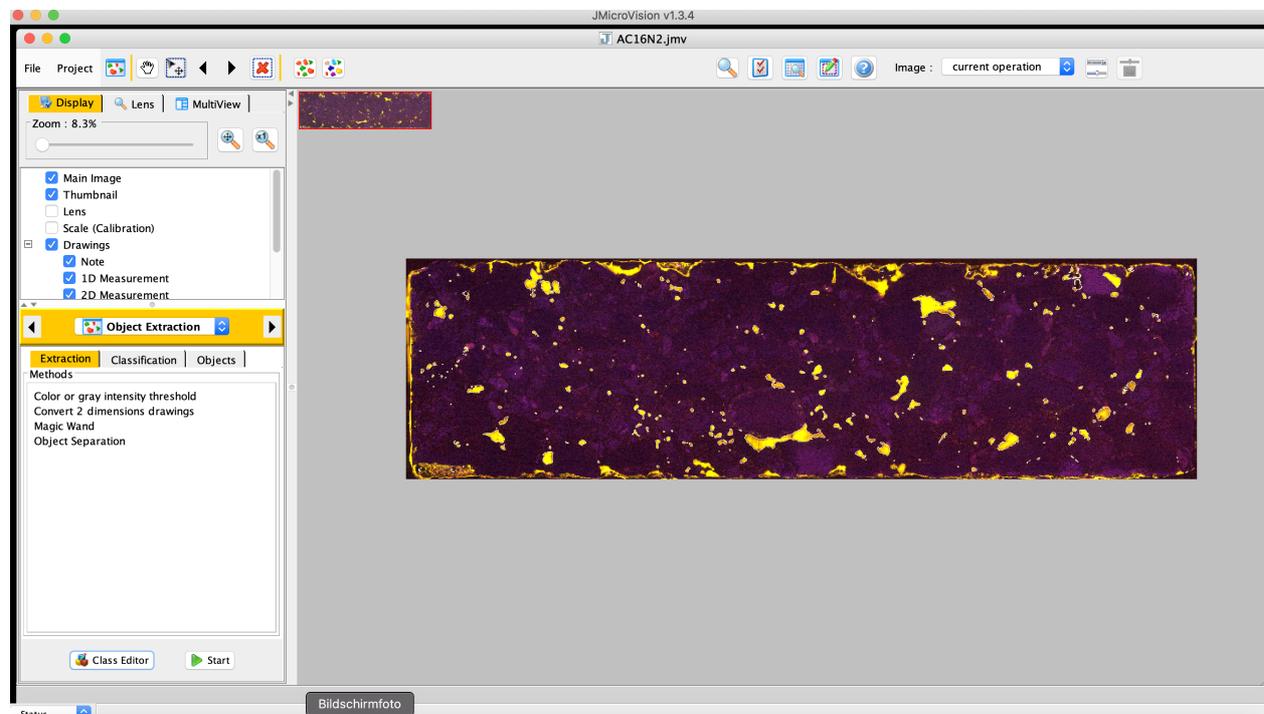


Abbildung 14: Anwendungsfenster der Software JMicroVision mit eingelesenem Anschluss

Der erste nötige Schritt ist die Kalibrierung des Längenmaßstabs. Dies ist notwendig, um Hohlraumflächen als metrische Einheit auslesen zu können. Standardmäßig berechnet das Programm alle Längen und Flächenmaße als Pixel. Je nach Scannermodell und Software ist die Bildauflösung bereits hinterlegt und wird automatisch genutzt. Sollte dies nicht der Fall sein, so kann die Auflösung des Scanners manuell eingetragen werden (Abbildung 15). Eine andere Option ist, im Scan einen Längenmaßstab unterzubringen und diesen innerhalb der Software zu definieren.

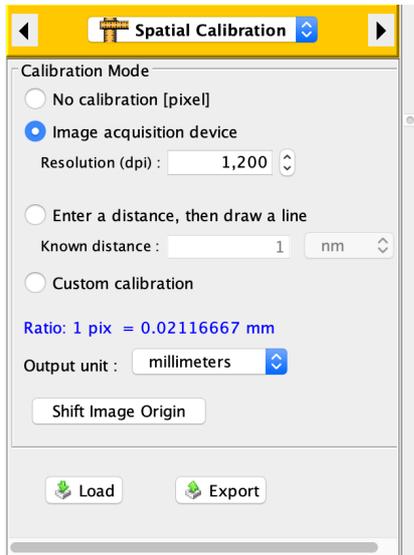


Abbildung 15: Dialog zum Einstellen der Kalibrierung

2.5.1.2 Festlegen des Auswertebereichs

Es bietet sich an, für die Hohlraumanalyse einen Auswertebereich festzulegen, der möglichst den ganzen Probekörper ein- und die Harzüberstände am Rand ausschließt. Die Auswahl der Area of Interest findet im Area-Editor statt. Hier bietet es sich an, entweder ein Rechteck zu wählen oder bei nicht ganz rechtwinkligen Proben ein Polygon, welches zu etwas längeren Berechnungszeiten führt. Neben der Auswertefläche kann auch direkt ein Profilbereich zugewiesen werden. Dieser ist in jedem Fall ein Rechteck und sollte in etwa die Größe der Auswertefläche haben, um alle erkannten Hohlräume ins Profil einzuschließen. Eine Probe mit festgelegten Bereichen (grün) ist in Abbildung 16 dargestellt.

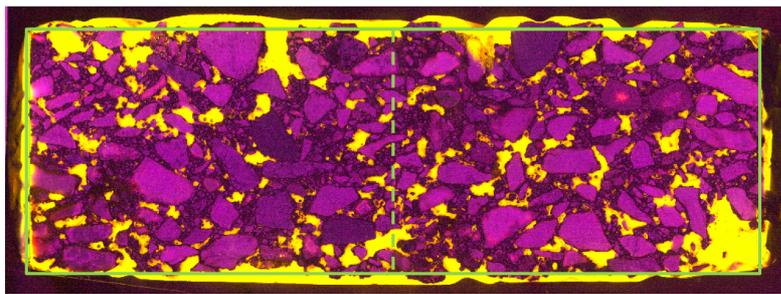


Abbildung 16: Anschliff mit festgelegtem Auswertebereich (durchgezogene Linie) und festgelegter Profilinie (gestrichelt)

2.5.1.3 Objekterkennung

Die Objekterkennung wird unter dem Menüpunkt „Object Extraction“ gestartet. Hier wird der Algorithmus „Color or Gray Intensity Threshold“ ausgewählt, da dieser die besten Einstellungsmöglichkeiten für die geplanten Auswertungen bietet.

Im Forschungsprojekt wurde auch die Funktion „Object Separation“ getestet. Diese wäre vom Einstellungsumfang noch etwas besser geeignet. Die Funktionalität ist auch für Asphalte mit runden Hohlräumen gegeben. Große, unregelmäßig geformte Hohlräume werden jedoch aufgrund der Funktionsweise des Algorithmus in einzelne Objekte zerlegt, was insbesondere bei Auswertung der Hohlraumgrößen ungeeignet ist. Aus diesem Grund wurde die Nutzung dieser Funktion wieder verworfen.

Wird der Objekterkennungsalgorithmus gestartet, öffnet sich eine Eingabemaske, die in Abbildung 17 dargestellt ist. In diesem Feld lassen sich zahlreiche Parameter einstellen, die im Rahmen des Forschungsprojekts ausführlich erprobt wurden und deren Einstellungen im Folgenden erläutert werden.

Area

Unter diesem Unterpunkt wird die Fläche gewählt, auf die der Algorithmus angewendet werden soll. Dies ist insbesondere wichtig, wenn entweder zwei Proben auf einmal eingescannt wurden und getrennt bearbeitet werden sollen oder falls der Bildausschnitt beim Scanner größer gewählt wurde als der Probekörper. Ausgewählt können hier entweder das gesamte Bild „Whole Image“ oder ein vorher festgelegter Auswerterahmen gewählt werden.

Surface Filter

Mit dieser Einstellung können minimale und maximale Größen für die zu erkennenden Objekte festgelegt werden. Die kleinstmögliche Objektgröße beträgt 10 Pixel, was bei einer Auflösung von 1200 dpi einer Hohlraumgröße von 0,0047 mm² entsprechen würde. Das größte Objekt, welches mit der Software berechnet werden könnte, hätte bei der genannten Auflösung 0,96 m². Die Einstellung der maximalen Größe wird für einen Standardfall nicht verändert. Zwar werden in den

untersuchten Asphaltproben keine Hohlräume dieser Größe auftreten, jedoch ist es schwierig eine maximale Abmessung festzulegen, da keine großen Hohlräume ausgeschlossen werden sollen. Die minimale Größe hat einen erheblichen Einfluss auf den Aufwand der Auswertung. Auf den ersten Blick scheint es gut, dass auch winzigste Hohlräume detektiert werden können, in der Praxis sind damit jedoch einige Probleme verbunden, von denen hier drei beleuchtet werden sollen.

Aufgrund des Bildrauschens kann nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Pixelgruppen auftreten, die zufällig im Farbspektrum des pigmentierten Epoxidharzes liegen, insbesondere in Bereichen, die nah an größeren Hohlräumen liegen. Dadurch kann es zu Fehlbestimmungen kommen.

Ein weiteres Problem sind Rückstände von Epoxidharz aufgrund der Präparation. Während des Schleifprozesses wird zwar mithilfe einer UV-Lampe die Beschaffenheit der Oberfläche überprüft. Es können aber noch geringe Reste des Harzes auf der Oberfläche verbleiben, die makroskopisch nicht zu erkennen sind. In der Vergrößerung die der Scanner bietet, werden diese detektiert und fälschlicherweise als Hohlraum bestimmt.

Zuletzt ist die Menge an fluoreszierendem Epoxidharz in sehr kleinen Hohlräumen häufig gering, sodass ein Teil dieser Kleinsthohlräume schwer detektiert werden kann. Es fehlt an entsprechendem Farbkontrast.

Diese genannten Gründe haben dazu geführt, dass für die Auswertung der Anschliffe eine Mindestgröße von $0,05 \text{ mm}^2$ für die Objekterkennung angegeben wird. Der Ausschluss der Kleinsthohlräume ist zu vernachlässigen, da diese für den Gesamthohlraumgehalt praktisch keine Rolle spielen und ihnen auch kein großer Effekt auf die Asphaltbefestigung zugeschrieben wird. Stichprobenartige Überprüfungen haben ergeben, dass der Ausschluss der Hohlräume $< 0,05 \text{ mm}^2$ die Anzahl der Hohlraumobjekte um 75 % reduziert, der Hohlraumgehalt sich aber lediglich um 0,1 % verändert.

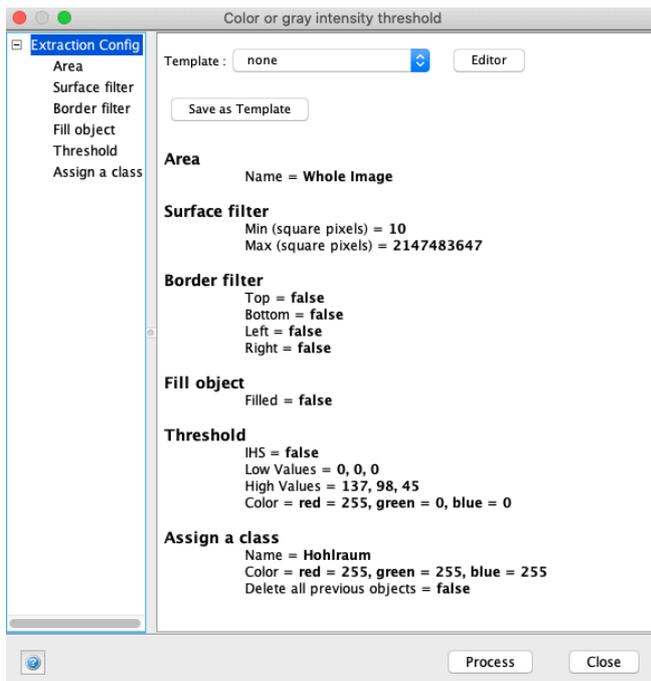


Abbildung 17: Eingabemaske des Objekterkennungsalgorithmus

Border Filter

Dieser Filter ermöglicht es Objekte von der Erkennung auszuschließen, die an den Rand des Auswertebereichs grenzen. Laborproben haben aufgrund der Herstellung eine sehr inhomogene Oberfläche mit kavernen Hohlräumen. Im Tauchwägungsverfahren werden diese bewusst nicht mit einberechnet. So sollte zur Vergleichbarkeit auch in der Bildanalyse auf diesen Teil der Poren verzichtet werden. Wenn hingegen eine Bohrkernprobe untersucht wird, so wurde zumindest die Deck- und Binderschicht auf eine weitere Asphaltenschicht gebaut. Der Hohlraumgehalt an deren unterem Rand spielt also auch für den Schichtenverbund eine Rolle und sollte einbezogen werden.

Fill Object

Diese Funktion wird standardmäßig aktiviert und führt dazu, dass alle Hohlraumobjekte ausgefüllt werden. Sollte sich bei der Präparation eine Luftblase in der Mitte gebildet haben, wird diese trotzdem detektiert und in alle Berechnungen mit einbezogen.

Threshold

Die Einstellung des Thresholds ist der zentrale Schritt der bildanalytischen Hohlraumbestimmung. Unter diesem Punkt wird festgelegt, welche Farbwerte zur Klasse der Hohlräume hinzugezählt werden und welche aus Asphaltmischgut bestehen. Für die Festlegung gibt es mehrere Modi. Anhand von Reglern kann ein bestimmter Farbbereich festgelegt werden, was sich aber als wenig

pragmatisch herausgestellt hat. Für den Zweck der asphaltpetrologischen Hohlraumbestimmung wird ein Werkzeug verwendet, welches ähnlich einer Farbpipette in Grafikprogrammen arbeitet. Das Werkzeug ist in Abbildung 18 mit einem roten Pfeil gekennzeichnet. Wird bei „Selection“ die Funktion „Add“ ausgewählt, so können durch einfaches Klicken in die gelbfarbigen Hohlräume die entsprechenden Farbwerte hinzugefügt werden. Dies wird solange durchgeführt, bis alle einwandfrei zu erkennenden Hohlräume vollständig markiert sind (rechte Seite der Abbildung 18). Es ist darauf zu achten, dass der Schwellwert nicht zu breit gesetzt wird, damit keine Farbwerte des restlichen Anschliffs einbezogen werden.

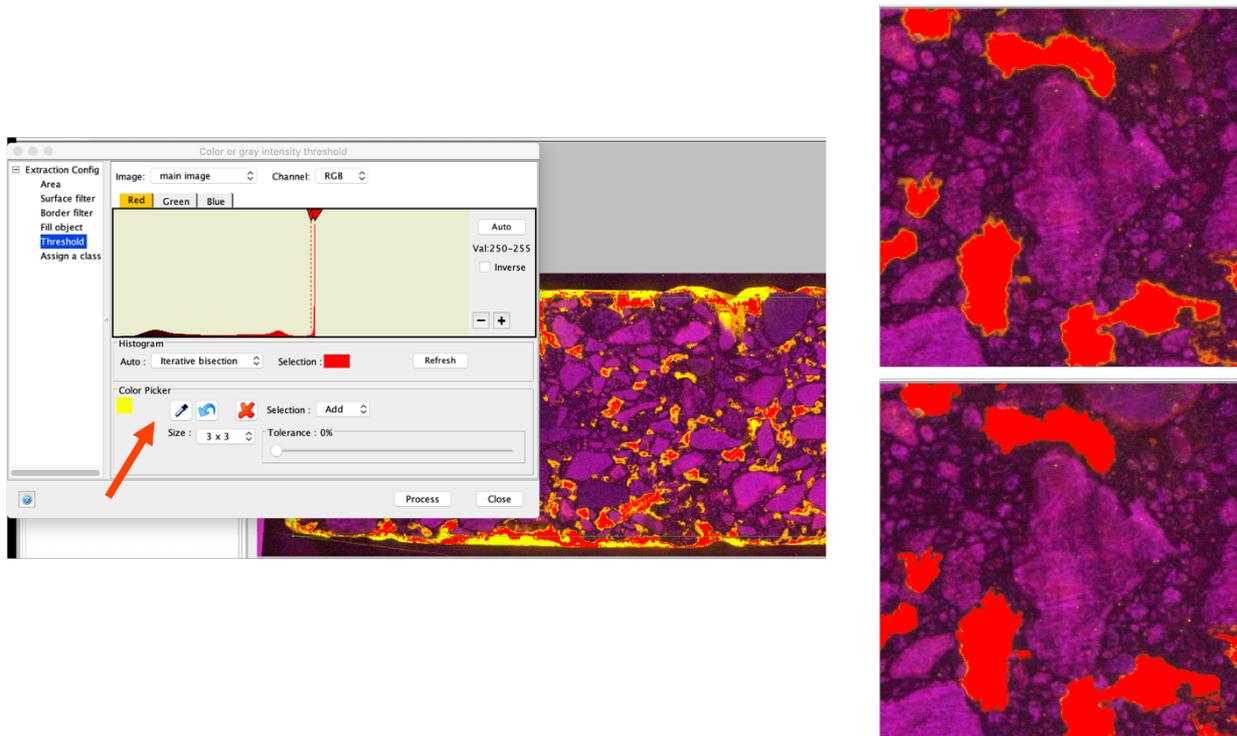


Abbildung 18: Einstellen des Tresholds mithilfe der Farbpipette

Assign a class

Hier wird zuletzt eine Klasse definiert, der die erkannten Objekte hinzugefügt werden sollen. Für den Zweck der Hohlraumbestimmung bietet sich an, eine einzelne Klasse mit dem Namen „Hohlraum“ zu erstellen.

Entsprechen alle gewählten Einstellungen den gewünschten Vorgaben kann über „Process“ die Objekterkennung gestartet werden. Je nach Zahl der Objekte und Größe der Probe kann dies einige Zeit in Anspruch nehmen. Alle Objekte werden im Anschluss dargestellt, indem sie farbig umrandet werden (Abbildung 19).

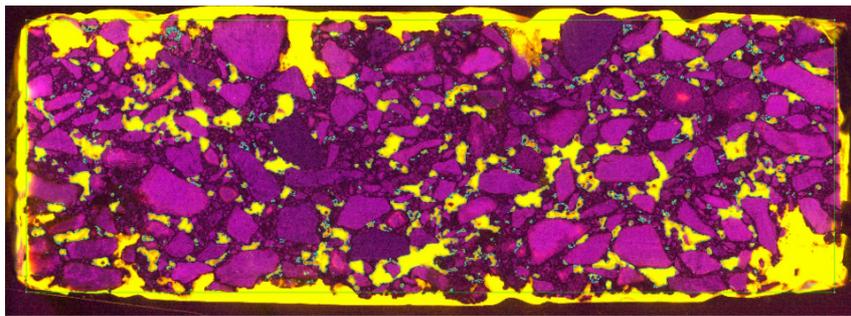


Abbildung 19: Anschliff mit umrandeten Hohlraumobjekten

Ist die Objekterkennung abgeschlossen, so steht im Nachgang das Postprocessing an, welches je nach Qualität des Anschliffs und Voreinstellungen unterschiedlich aufwendig ausfällt. Durch den Ausschluss von Objekten $< 0,05 \text{ mm}^2$ konnte der Aufwand bereits erheblich reduziert werden, da viele Fehlbestimmungen ausgeschlossen werden. Trotzdem werden in nahezu allen Auswertungen Hohlräume detektiert, die händisch gelöscht werden sollten. Insbesondere sind das solche Hohlräume, die sich innerhalb von Gesteinskörnern befinden. Diese können entweder durch Eigenfluoreszenz des Gesteins ausgelöst werden, oder durch eine gewisse Porosität des Gesteins, welche mit Epoxidharz verfüllt ist. Diese Hohlräume im Gestein haben jedoch keine Relevanz für die Eigenschaften des Werkstoffs Asphalt und sind deshalb auszuschließen.

Sollten einzelne Hohlraumobjekte nicht erkannt worden sein, dann können diese mit dem „Magic Wand“ Werkzeug im „Object Extraction“ Menü hinzugefügt werden.

2.5.1.4 Auswertung

Zur Auswertung der Hohlraumobjekte steht in der Software JMicroVision eine ausführliche Wertetabelle zur Verfügung, die in der Toolbar unter dem Punkt „Data Viewer“ aufgerufen werden kann. Diese Tabelle enthält Einträge für sämtliche erkannte Projekte und deren Parameter, die in Kapitel 2.4.1 aufgeführt wurden. Gleichzeitig bietet das Programm die Funktion einer grafischen Darstellung der einzelnen Objektkennwerte. Diese lässt sich aber nicht individuell anpassen und wird daher nicht weiter genutzt. Die Liste kann als Wertetabelle exportiert und für die weitere Verarbeitung genutzt werden. Unter „Mode: Classes“ kann der flächenbezogene Hohlraumgehalt der Probe abgelesen werden.



Abbildung 20: Dialogfeld zum Erstellen eines Hohlraumprofils

Zusätzlich zu dieser Wertetabelle wird ein Profil für die Hohlraumtiefenverteilung erstellt. Hier muss im linken Funktionsmenü der Punkt „Profile“ ausgewählt werden. Daraufhin öffnet sich ein Kontextmenü, in dem der Profilbereich, welcher zuvor festgelegt wurde ausgewählt wird. Das Profil soll anhand der Objekte aus der Klasse „Hohlraum“ erstellt werden (Abbildung 20). Das so generierte Profil wird im Anschluss im Fenster der Software dargestellt und lässt sich auch als Textdatei exportieren.

2.5.2 Anwendbarkeit des Verfahrens

Zur Prüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens auf verschiedene Asphaltarten wurden von der Firma Wilhelm Schütz GmbH & Co. KG und der Mitteldeutschen Hartsteinindustrie AG Probenmischungen und Bohrkerne zur Verfügung gestellt. Außerdem konnten aus einer Versuchsstrecke, die nur halbseitig walzverdichtet wurde, Bohrkerne entnommen werden um den Einfluss der Walzverdichtung auf das Hohlraumgefüge zu betrachten.

2.5.2.1 Untersuchung von Laborproben

Zunächst wurden im Projekt drei Asphalte beispielhaft ausgewählt, um die Eignung von Marshall-Probekörpern zur Hohlraumanalyse zu prüfen. Um drei Korngrößenbereiche abzudecken wurden ein AC 32 TS, ein AC 16 BS und ein AC 8 DL gewählt. Es ist bekannt, dass Marshall- Probekörper insbesondere bei grobkörnigem Mischgut nur wenig geeignet sind, da die Größe der Verdichtungsform begrenzt ist. Dadurch kommt es zu größeren Streuungen der Prüfergebnisse. Diese Problematik konnte im Projekt auch aufgezeigt werden. In der folgenden Abbildung sind auf der linken Seite zwei Anschliffe des AC 16 BS und auf der rechten Seite zwei Anschliffe des AC 32 TS dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Struktur der Hohlräume deutlich innerhalb einer Asphaltmischgutsorte unterscheidet.

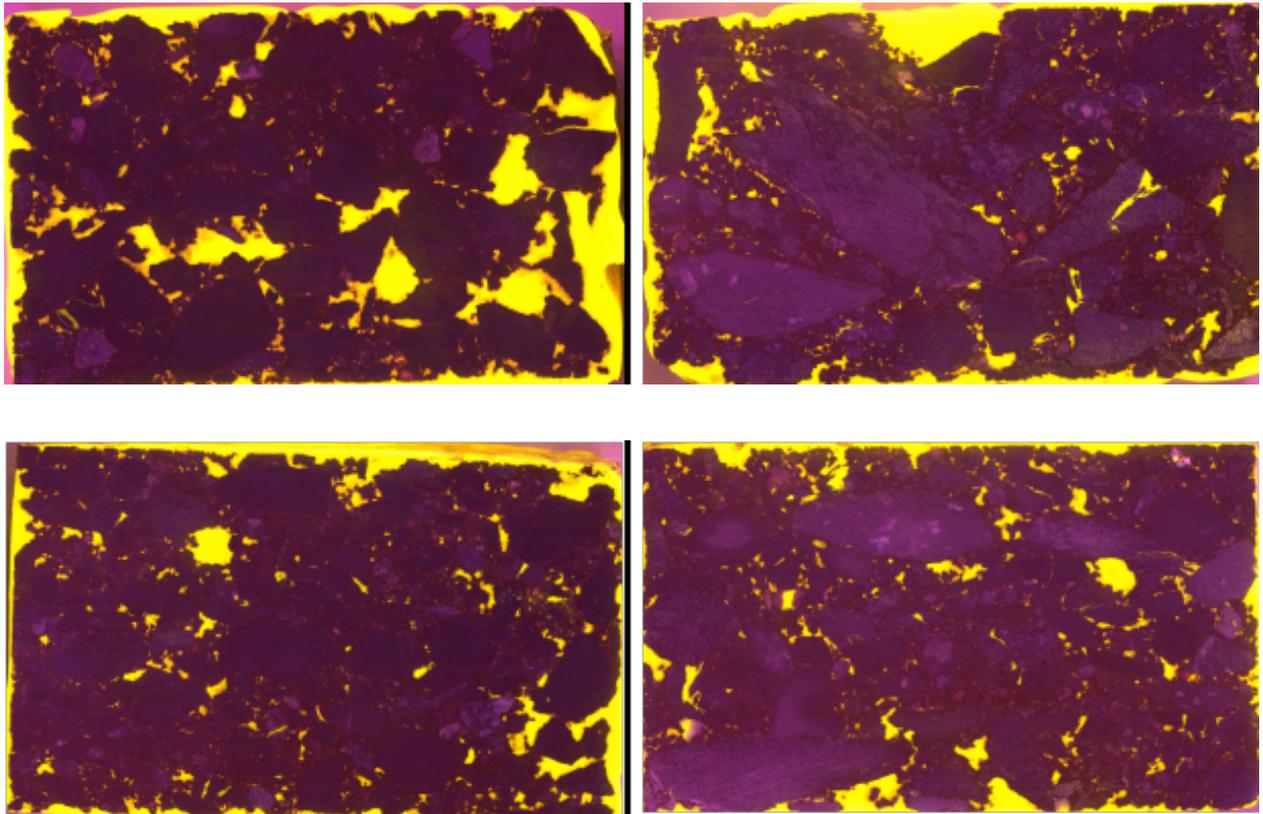


Abbildung 21: links: Anschliffe eines AC 16 BS; rechts: Anschliffe eines AC 32 TS (gelb: Hohlräume)

Zusätzlich zu dieser asphaltpetrologischen Auswertung der drei Mischgutproben wurde durch die ZuB GmbH eine konventionelle Hohlraumbestimmung durchgeführt. Die asphaltpetrologische Auswertung der Hohlraumgehalte wurde dem gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 aufgezeigt.

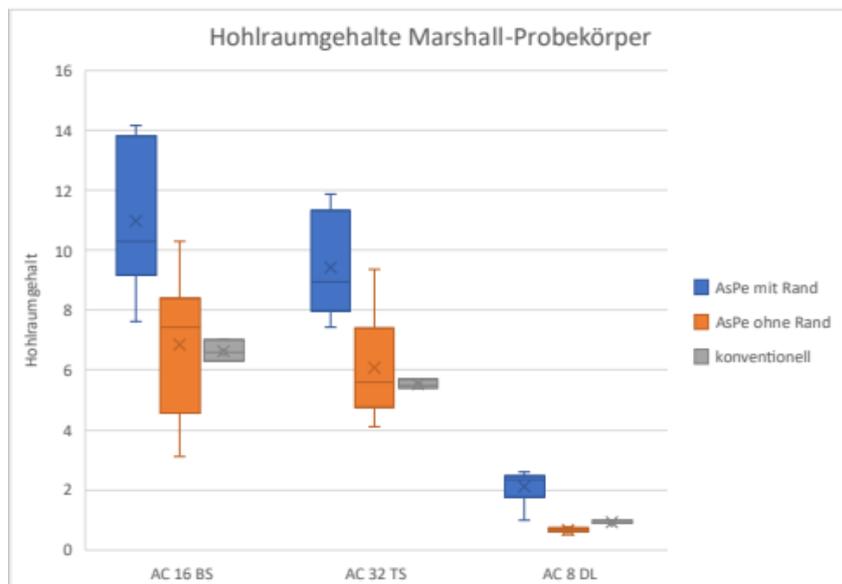


Abbildung 22: Vergleich der Hohlraumgehalte von drei Asphalten

Auch in dieser Darstellung wird deutlich, dass die Streuung der Hohlraumgehalte in der asphaltpetrologischen Auswertung bei den grobkörnigen Mischgutsorten deutlich größer sind, als beim feinkörnigen Asphaltdeckschichtmischgut. Dies ist der gröberen Gesamtstruktur geschuldet, die eine vielfältigere Hohlraumgeometrie zulässt, jedoch auch der Art des Probekörpers. Erfreulich ist, dass die asphaltpetrologisch ermittelten Hohlraumgehalte trotz größerer Streuung gut mit den konventionell ermittelten vergleichbar sind.

Im Rahmen dieser Auswertung wurde auch geprüft, ob der Randbereich der Probekörperscans mit in die Auswertung der Hohlräume einbezogen werden soll. Wird der Randbereich mit einbezogen, dann werden auch Hohlräume an den Rändern der Probekörper in den Hohlraumgehalt eingerechnet. Allerdings sind in diesen Bereichen auch Harzüberstände aus der Präparation enthalten. Entfallen die Randbereiche, so wird dieser Umstand ausgeschlossen, es werden aber auch Hohlräume an den Oberflächen ignoriert. Zur besseren Erläuterung sind zwei Auswertungen des gleichen Probekörpers in Abbildung 23 aufgezeigt.

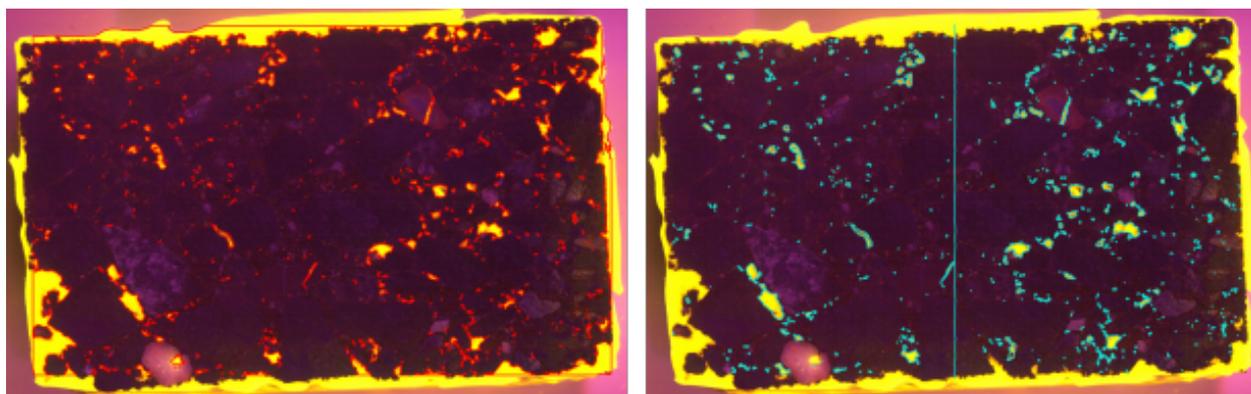


Abbildung 23: links: Auswertung AC 16 BS mit einbezogenem Randbereich (rot: Detektierte Hohlräume); rechts: Auswertung AC 16 BS ohne Randbereich (blau: Detektierte Hohlräume)

Die in Abbildung 22 gezeigte Auswertung legt nahe, dass die Randbereiche der Anschliffe auszuschließen sind, da sie sowohl die Streuung der Einzelwerte vergrößern und die Vergleichbarkeit zur konventionellen Auswertung verschlechtern.

Im weiteren Projektverlauf wurden Walzsektorplatten als Laborprobekörper verwendet. Diese bieten den Vorteil, dass aufgrund der größeren Geometrie auch grobkörniges Asphaltmischgut adäquat verdichtet werden kann. Insgesamt wurden von acht Asphaltmischgutsorten jeweils zwei Walzsektorplatten hergestellt und untersucht. Von jeder dieser Platten wurden vier Anschliffe hergestellt, um über eine größere Anzahl von Ergebnissen mitteln zu können. Im Folgenden werden zur Vergleichbarkeit ebenfalls die Asphaltmischgutsorten AC 32 TS, AC 16 BS und AC 8 DN ausgewertet (Abbildung 24).

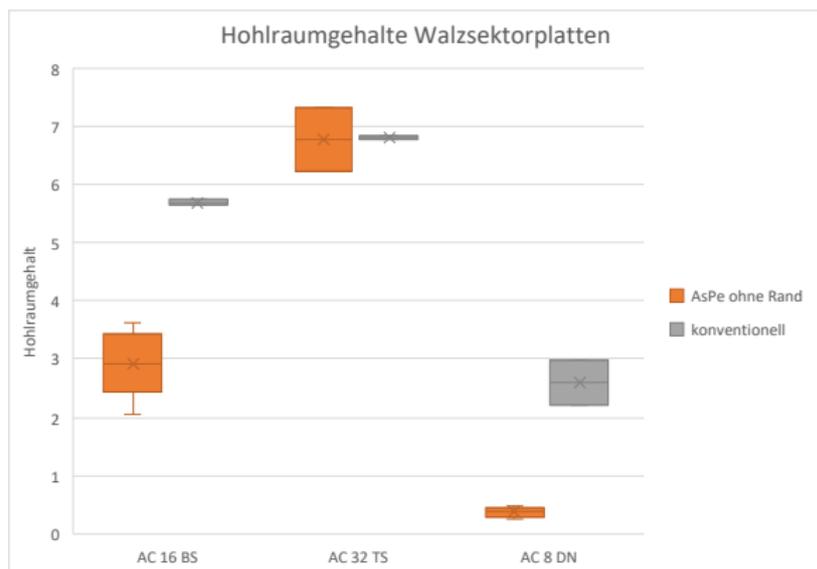


Abbildung 24: Vergleich der asphaltpetrologisch und konventionell bestimmten Hohlraumgehalte an Walzsektorplatten

Wie zu erwarten, ist der Streubereich der asphaltpetrologisch bestimmten Hohlraumgehalte an Proben aus dem Walzsektorverdichter deutlich kleiner als bei Marshall-Probekörpern. Dies lässt sich durch zwei Effekte erklären. Zum einen ist die Hohlraumverteilung in den Walzsektorplatten deutlich homogener als in Marshall-Probekörpern. Dies war zu erwarten, da die Größe der Verdichtungsform und die Art der Verdichtung günstigere Voraussetzungen für grobkörniges Asphaltmischgut bieten. Zum anderen sind die Anschliffe deutlich größer, was nach Tielmann-Unger (2019) eine größere Genauigkeit der bestimmten Kennwerte liefert.

Zur Visualisierung der gesteigerten Homogenität in den Walzsektorplatten werden in den folgenden Abbildungen 25-28 jeweils zwei Anschliffe des AC 16 BS und AC 32 TS präsentiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich ein erheblicher Unterschied zu den Anschliffen in Abbildung 21 ergibt. Sowohl die Verteilung der Gesteinskörnung als auch die der Hohlräume sieht erkennbar gleichmäßiger aus.

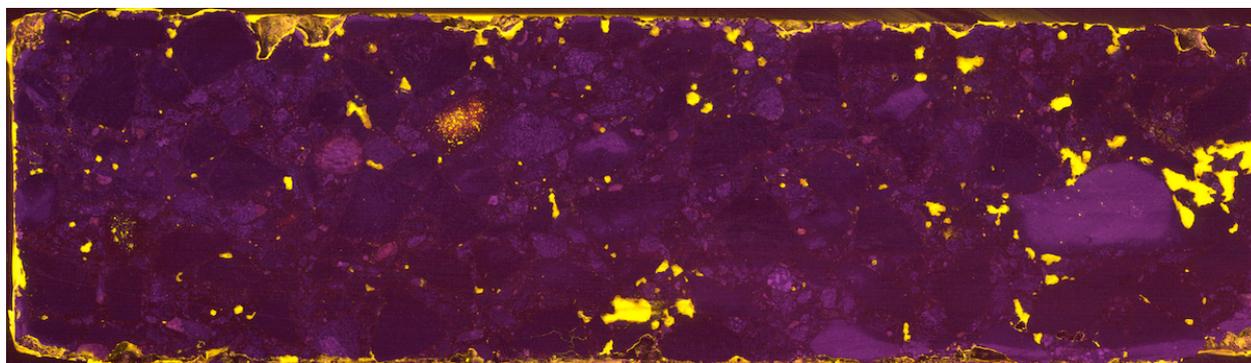


Abbildung 25: Anschliff einer AC 16 BS Walzsektorplatte

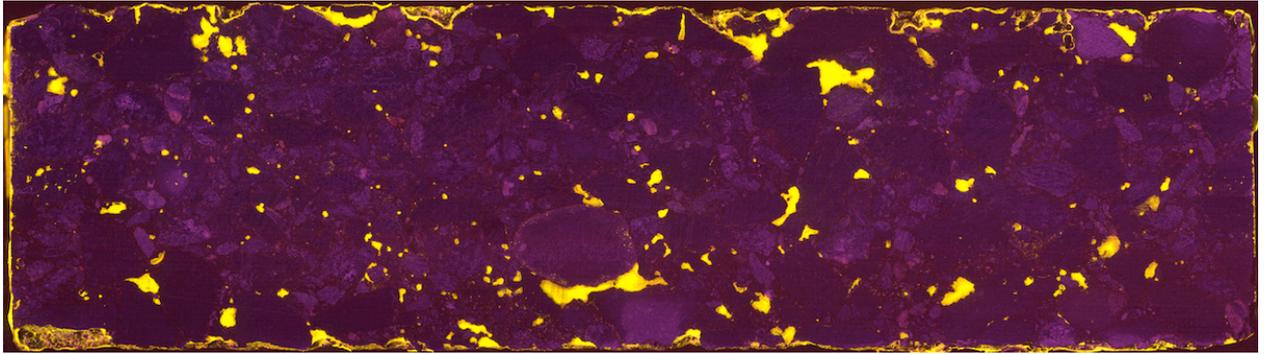


Abbildung 26: Anschliff einer AC 16 BS Walzsektorplatte

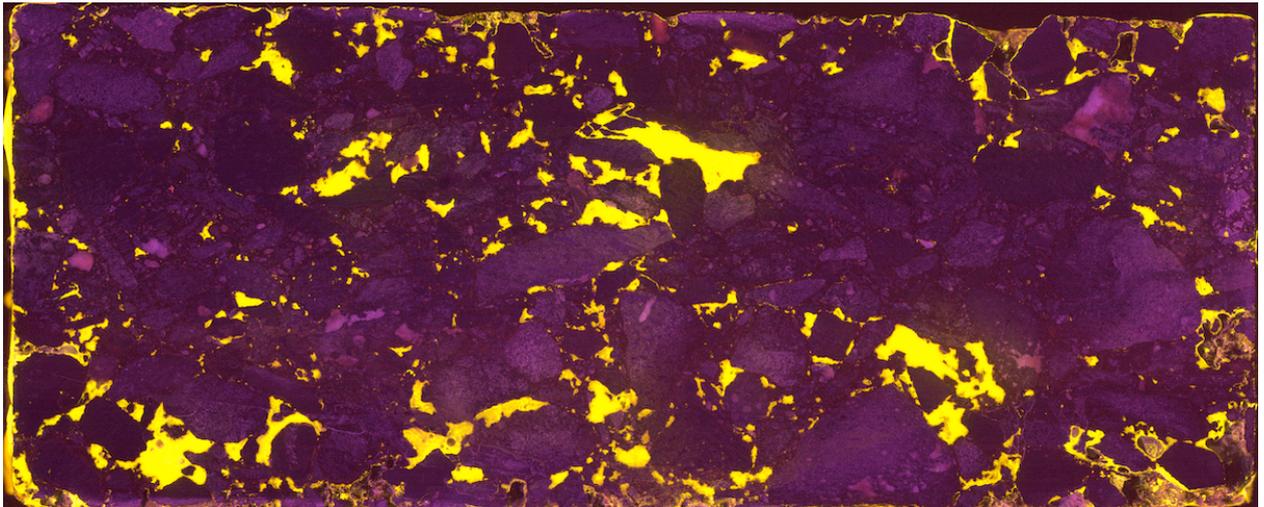


Abbildung 27: Anschliff einer AC 32 TS Walzsektorplatte

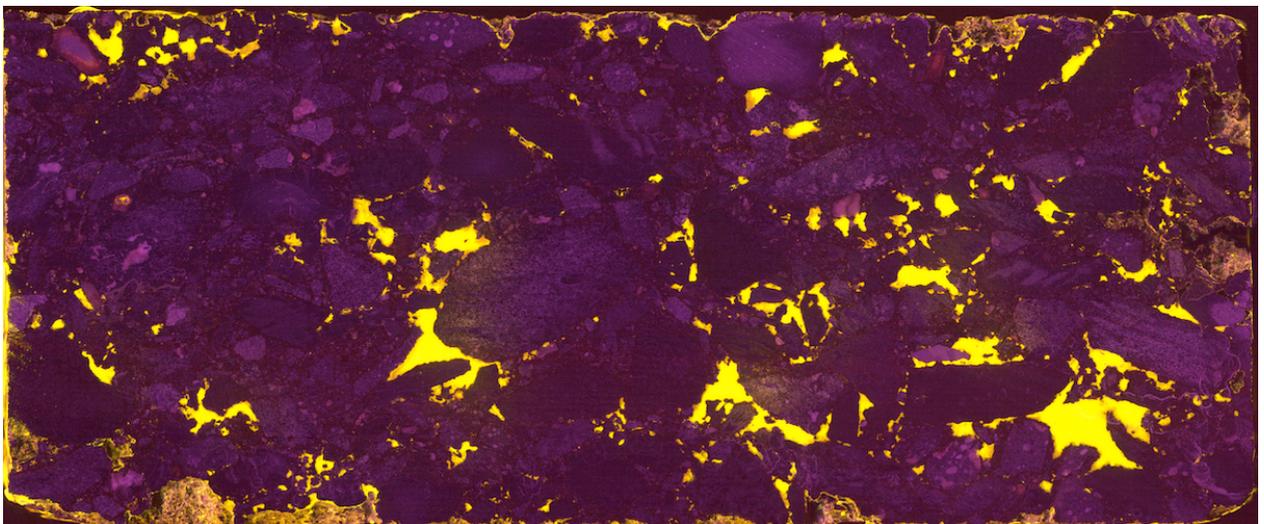


Abbildung 28: Anschliff einer AC 32 TS Walzsektorplatte

2.5.2.2 Untersuchung an Bohrkernen

Die Untersuchung an Bohrkernen ist präparatorisch schwieriger, da aufgrund der Form beim Trennen eine feste Einspannung benötigt wird. Die verwendete Präzisionstrennmaschine verfügt über Klemmbacken, die dies ermöglichen. Die weiteren Präparationsschritte erfolgen analog zu Probekörpern und sind problemlos anwendbar.

Während der Projektlaufzeit konnten immer wieder zusätzliche Bohrkern von Schadensfällen probeweise präpariert werden. Dabei wurde deutlich, dass die Analyse von asphaltpetrologischen Anschliffen auch hier eine große Hilfe sein kann. So können die detektierten Hohlräume im Hinblick auf ihre Größe und Verteilung bewertet werden, aber auch andere schädigende Prozesse sichtbar gemacht werden. Hier sind beispielsweise Entmischungen innerhalb des Asphaltmischguts, Rissbildungen, Kornzertrümmerung und Bindemittelablösungen zu nennen.

Ein weiterer bearbeiteter Ansatz ist der Einfluss der Walzverdichtung auf die Hohlraumstruktur innerhalb eines Asphaltmischguts. Hierzu konnten im großen Maß Bohrkern auf einer Versuchsstrecke entnommen werden, die nur halbseitig walzverdichtet wurde. Diese wurden im Anschluss präpariert und asphaltpetrologisch ausgewertet. Die Ergebnisse werden in 2.5.3.2 näher erläutert.

2.5.3 Weiterverarbeitung der Daten

Wie zuvor beschrieben eignen sich die Softwaretools von JMicroVision nur bedingt zur visuellen Auswertung der Hohlraumdaten. Diese ist jedoch wichtig, um Unterschiede und Abhängigkeiten zwischen Hohlraumparametern und Einbaubedingungen deutlich zu machen. Nur eine gute Darstellung führt zum Verständnis und zur Akzeptanz der Ergebnisse. Aus diesem Grund wurden zur Visualisierung der gewählten Hohlraumparameter (Hohlraumgröße und Hohlraumverteilung) weitere Auswertemethodiken entwickelt, um die gewonnenen Daten aus JMicroVision auslesen und verarbeiten können.

Herausfordernd war bei dieser Aufgabe, dass viele Informationen in einer verständlichen Abbildung untergebracht werden müssen. Es hat sich herausgestellt, dass bei einigen Ansätzen wichtige Informationen nur schwer herauszulesen waren und die Grafik deshalb unverständlich wurde. Die Weiterentwicklung der Algorithmen war daher in der Projektlaufzeit ein ständiger laufender Prozess. Dabei konnten Visualisierungen gefunden werden, die die wichtigen Informationen bildlich darstellen können.

Bei allen programmierten Algorithmen werden die exportierten Daten aus JMicroVision aus Textdateien eingelesen. Generell wird erlaubt, mehrere Proben miteinander zu vergleichen und für die jeweilige Probe über mehrere Anschliffe zu mitteln. In der Datentabelle müssen Fläche und Breite

der Auswertefläche in Pixel händisch aus JMicroVision übertragen werden. Die Programmcodes wurden so erstellt, dass die User zur Eingabe der entsprechenden Daten aufgefordert werden. Sind alle Daten eingelesen, wird eine entsprechende Grafik mit den berechneten Informationen erstellt und als PNG im Projektorder abgespeichert.

2.5.3.1 Hohlraumverteilung

Die Darstellung von Hohlraumverteilungen kann auf mehrere Arten erfolgen. Die einfachste Möglichkeit ist, ein Profil des prozentualen Hohlraumanteils über die Tiefe der Probe zu plotten. Dies entspricht dem Vorgehen, welches durch JMicroVision durchgeführt wird. Im Programm erfolgt eine pixelzeilenweise Auswertung des Anteils von Pixeln mit dem Objekt Hohlraum im Verhältnis zur Gesamtpixelanzahl in der Zeile (Abbildung 29). Diese Zahl wird als Prozentsatz ausgegeben. Dieser Datensatz bietet die Grundlage für die Weiterverarbeitung in Python Algorithmen.

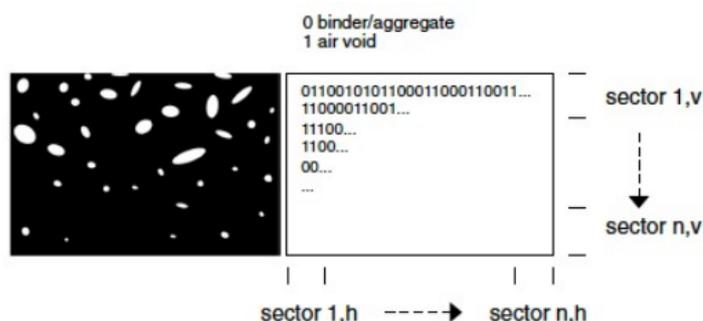


Abbildung 29: Vorgehen der Profilfunktion (Tielmann & Hill, 2018)

Um einzelne Peaks in der Hohlraumverteilung abbilden zu können, bietet es sich an, zunächst das Profil darzustellen. Dies wurde in Abbildung 30 exemplarisch an einer Deck- Binder- und Trag- schicht durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass insbesondere bei den grobkörnigeren Asphalten zum Teil erhebliche Hohlraumpeaks zu erkennen sind, die sich auch untereinander unterscheiden, obwohl die Anschliffe jeweils aus der gleichen Walzsektorplatte angefertigt wurden. Dies ist den großen Hohlraumgrößen geschuldet, bei denen je nach Schnittebene unterschiedliche Querschnitte getroffen werden. Erfreulich ist, dass bei allen Platten auch Anreicherungen gefunden werden können, die sich in allen Anschliffen gleichermaßen finden lassen, so zum Beispiel zwischen 10 und 14 mm beim AC 8 D N oder zwischen 5 und 15 mm beim AC 16 B S. Das zeigt eindeutig, dass die Profile wiederholbar eine Struktur abbilden, die in den Walzsektorplatten enthalten ist. Die Methode ist somit zur Abbildung von Hohlraumverteilungen geeignet. Nachteilig ist, dass Verschiebungen der Hohlraumverteilung in bestimmte Probekörperbereiche nur schwer zu erkennen sind. Daher wurde eine weitere Darstellungsoption gewählt.

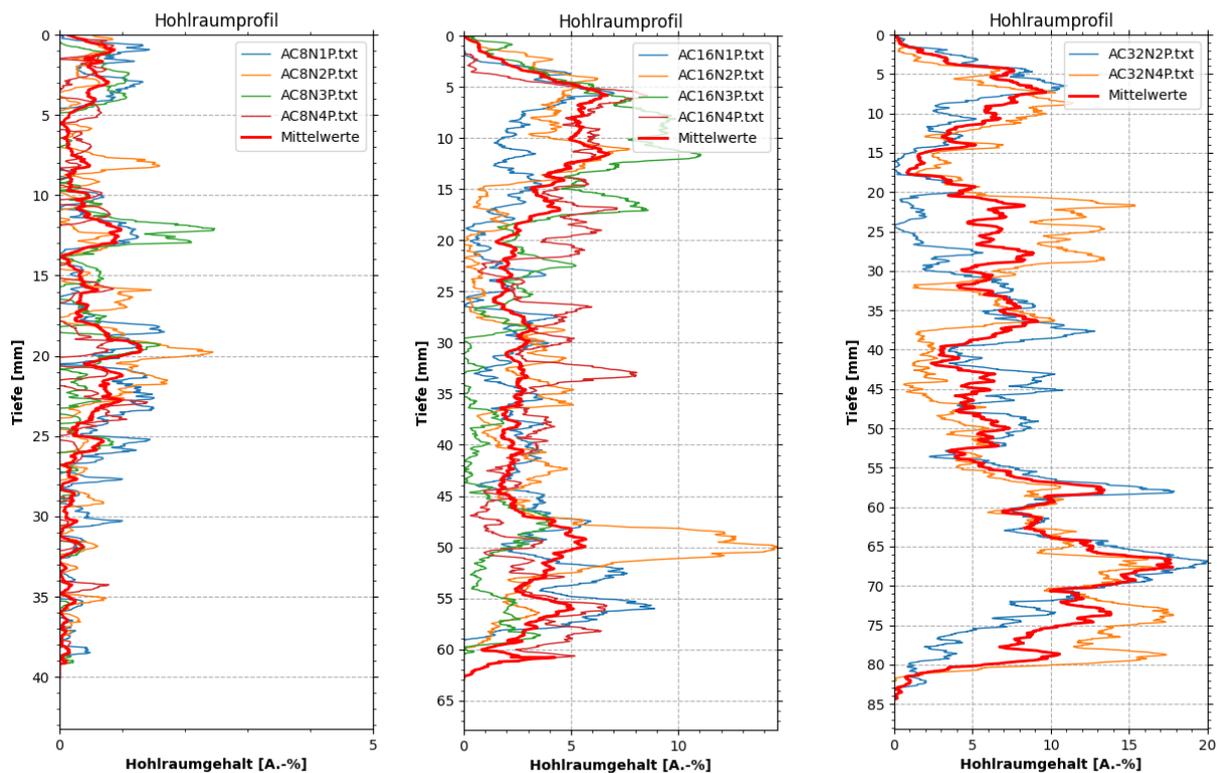


Abbildung 30: Hohlraumprofile der Anschlüsse AC 8 D N, AC 16 B S und AC 32 T S

Um Trends besser sichtbar zu machen, bietet es sich an, den Hohlraumgehalt, bzw. die von Hohlräumen ausgefüllte Fläche der Probe über die Tiefe aufzusummieren. Damit kann bestimmt werden, in welchen Tiefenlagen besonders viel Hohlraumfläche enthalten und wie homogen die Verteilung über die Tiefe ausgebildet ist. In Abbildung 31 wurde diese Darstellungsoption für die gleichen Profile wie in Abbildung 30 gewählt. Da die Hohlraumflächen der einzelnen Proben stark variieren können, ist eine Aufsummierung der tatsächlichen Werte visuell wenig aussagekräftig. Daher wurde der prozentuale Anteil des Gesamthohlraums pro Tiefeneinheit als X-Wert aufgetragen. Die senkrechte Linie markiert 50% der Hohlraumfläche eines Probekörpers, die waagerechte Linie die Hälfte der Probenkörperdicke.

Bei der Deckschicht ist zu erkennen, dass 80-90 % des Hohlraumgehalts aller vier Proben in den oberen 2/3 der Anschliffe enthalten sind. Die Verteilung der Hohlräume bis an diesen Punkt ist relativ homogen. Eine homogene Verteilung der Hohlraumfläche über die Tiefe ist für die Binderschicht gegeben. Hier weicht allerdings die Probe AC16N3P ab und zeigt eine große Hohlraum-anreicherung in den ersten 20 mm. Dieser Bereich ist in Abbildung 30 zwar auch als Peak zu erkennen, jedoch kann dort nicht auf diese große Inhomogenität geschlossen werden. Die Tiefenverteilung der Asphalttragschichten verhält sich sehr ähnlich.

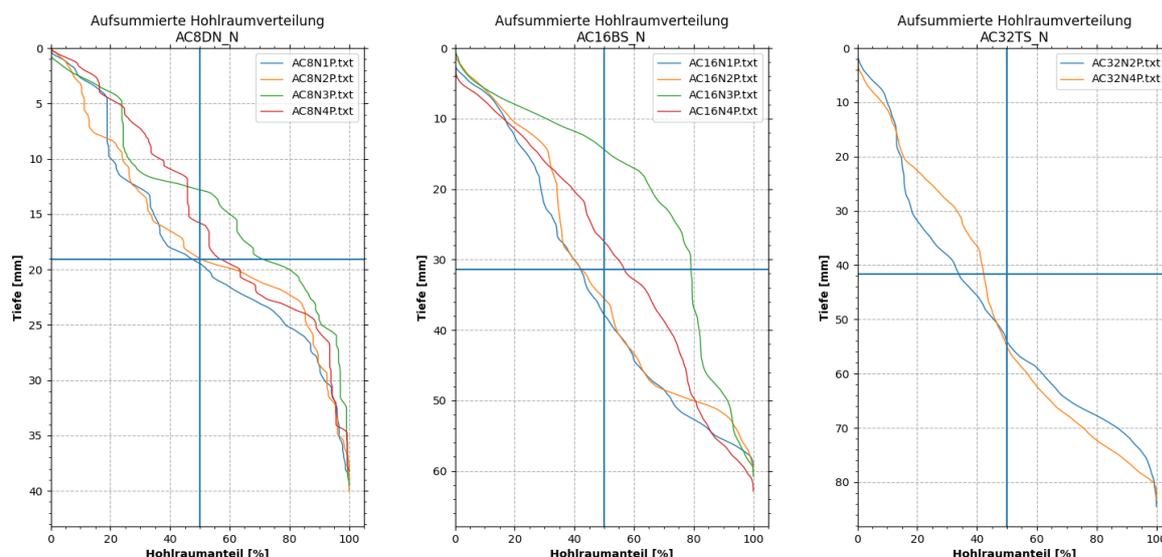


Abbildung 31: Hohlraumtiefenverteilung als aufsummierte Hohlraumfläche in Prozent

Werden mehrere Anschliffe des gleichen Probekörpers untersucht, ist die vorgenannte Darstellungsweise geeignet, um sich einen Eindruck über die Homogenität der Hohlraumverteilung zu verschaffen. Werden jedoch Probekörper, die unterschiedliche Dicken haben, verglichen, wie bspw. bei verschiedenen Verdichtungsstufen, fällt der Vergleich schwieriger. Zu diesem Zweck wurde eine weitere Darstellungsoption implementiert. Hierbei werden die Anschliffe in drei gleichgroße Tiefenabschnitte unterteilt, für die jeweils die enthaltene Hohlraumfläche berechnet wird. Die zuvor verwendeten Profile wurden auch für Abbildung 32 verwendet.

In dieser Ansicht bestätigt sich der Eindruck für die Deckschichten aus der vorherigen Abbildung. Im unteren Bereich der Proben sind kaum Hohlräume enthalten. Bei der Binderschicht hingegen sind im oberen und unteren Bereich die Hohlräume angereichert. Hier hat sicherlich der Anschliff AC16N3P eine hohe Relevanz, der eine stark verschobene Hohlraumverteilung aufweist. Für die Tragschicht ist die Hohlraumverteilung etwas nach unten verschoben. Dies könnte beispielsweise

durch die Dicke der Probe begründet sein. Die Verdichtungsenergie des Walzsektorverdichters reicht mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht in die Tiefe einer dicken Tragschicht.

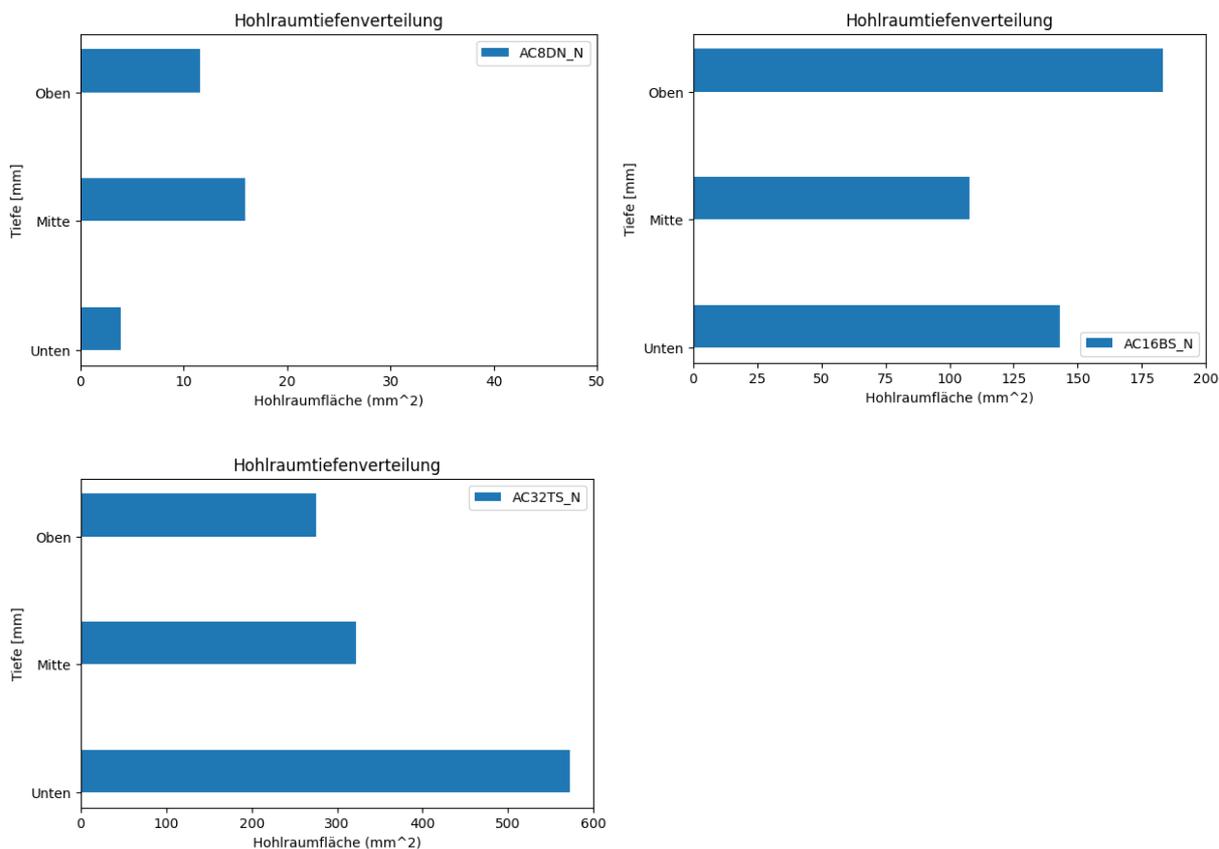


Abbildung 32: Darstellung der Hohlraumtiefenverteilung als Hohlraumfläche im jeweiligen Tiefenabschnitt für die drei Asphaltbetone

2.5.3.2 Hohlraumgröße

Eine interpretierbare Darstellung zur Visualisierung der Hohlraumgrößenverteilung stellte im Projekt eine besondere Herausforderung dar. So ist es relativ einfach möglich, ein Histogramm der Hohlraumgrößen zu erstellen, jedoch wird dieses schnell unübersichtlich, da prozentual die Klassen der Kleinsthohlräume um bis zu zwei Größenordnungen mehr besetzt sind, als die der großen Hohlräume. Ein Beispiel ist in Abbildung 33 dargestellt. Das Histogramm wurde dem Data Viewer von JMicroVision entnommen. Die zuvor beschriebene Problematik ist deutlich zu erkennen. Werden alle Hohlräume ab 0,0047 mm² einbezogen, wird der Effekt noch deutlich größer.

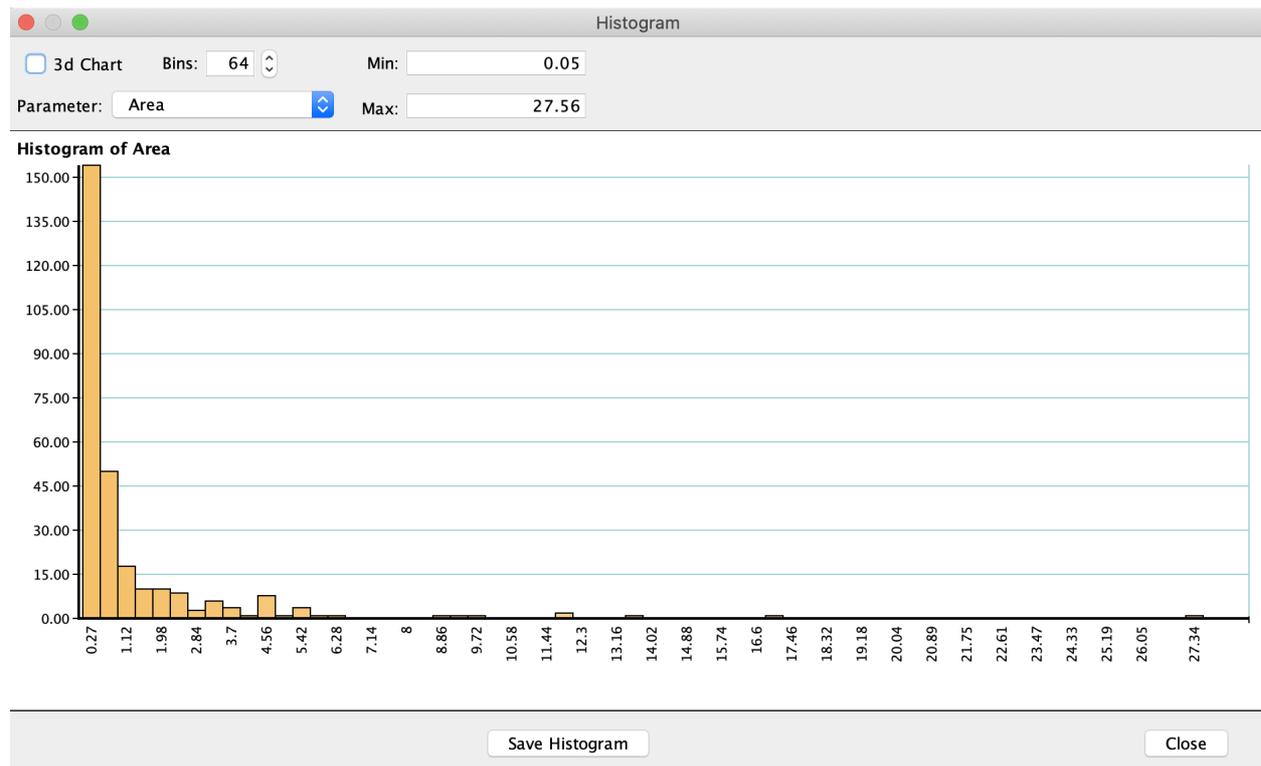


Abbildung 33: Histogramm einer Hohlraumgrößenverteilung, entnommen aus JMicroVision

Diese Unzulänglichkeiten der Histogrammdarstellung waren so für die Auswertung der Anschliffe nicht sinnvoll. Daher wurde die Darstellung der Hohlraumgrößenverteilung im Projekt ständig weiterentwickelt und ist schließlich zu dem Stand angekommen, der in Abbildung 34 gezeigt wird. Auf der linken Seite der Abbildung wird die Gesamtfläche der Probe, bzw. die gemittelte Gesamtfläche aller Anschliffe einer Probe dargestellt. Diese wird aufgeteilt in hohlraumfreie Fläche und die Klassen 0,05-0,1 mm, 0,1-1 mm, 1-10 mm und 10-100 mm. Auf der rechten Seite der Abbildung werden nur die Hohlraumflächen dargestellt, um diesen Bereich zu vergrößern. So ist ein Vergleich der Anteile der einzelnen Hohlraumklassen am Gesamthohlraumgehalt visuell möglich.

Bei Betrachtung der Abbildung ist zunächst erkennen, dass sich die Gesamtfläche der ausgewerteten Proben unterscheidet. Dies ist durch die unterschiedliche Dicke der Walzsektorplatten zu begründen. Auch fällt auf, dass die kleinste Hohlraumklasse, die in Abbildung 33 die größte Besetzung hat nahezu keinen Anteil an der Gesamtfläche der Hohlräume hat. Wie zu erwarten war, zeigt das grobkörnigste Asphaltmischgut in der Darstellung auch die größten Hohlräume. Dieses Ergebnis ist somit plausibel und zeigt, dass die Visualisierungsmethode zur Darstellung einer Hohlraumgrößenverteilung geeignet ist.

Hohlraumgrößenverteilung

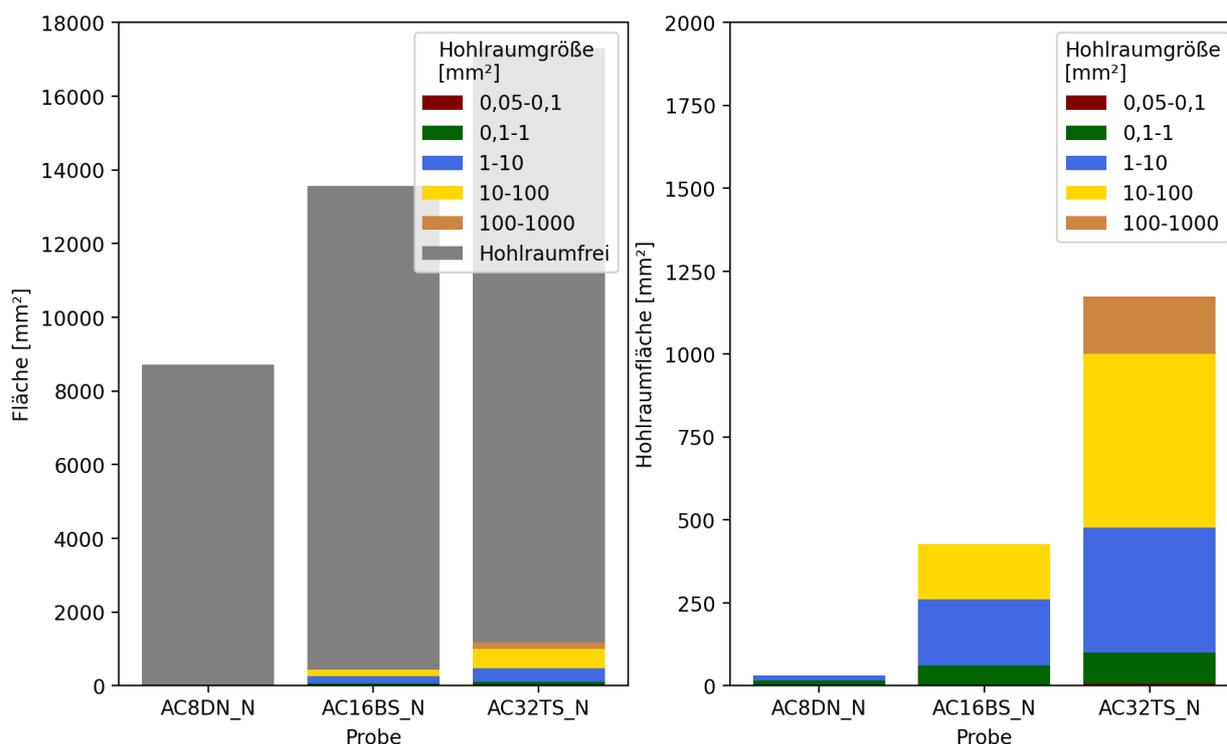


Abbildung 34: Hohlraumgrößenverteilung von drei untersuchten Asphaltmischgutsorten

Zusätzlich zum Vergleich des verschiedenen Asphaltmischguts ist es auch möglich, gleiches Asphaltmischgut in verschiedenen Verdichtungszuständen zu analysieren. (vgl. Abbildung 35) Im Forschungsprojekt konnten Bohrkerns aus einer Versuchsstrecke entnommen und ausgewertet werden, an denen nur eine Hälfte der Einbaubahn mit einer Walze verdichtet wurde. Somit kann abgelesen werden, wie sich die Hohlraumgrößenverteilung durch die Verdichtung mit einer Tandemwalze verändert. Der Anteil der mittelgroßen und großen Hohlräume nimmt ab, wohingegen der Anteil an kleinen Hohlräumen im Verhältnis zunimmt. Diese Vergleichbarkeit von Hohlraumgrößenverteilungen kann genutzt werden, um bei bekannten mechanischen Kennwerten eine optimale Abstimmung des Gefüges zu erreichen.

Hohlraumgrößenverteilung

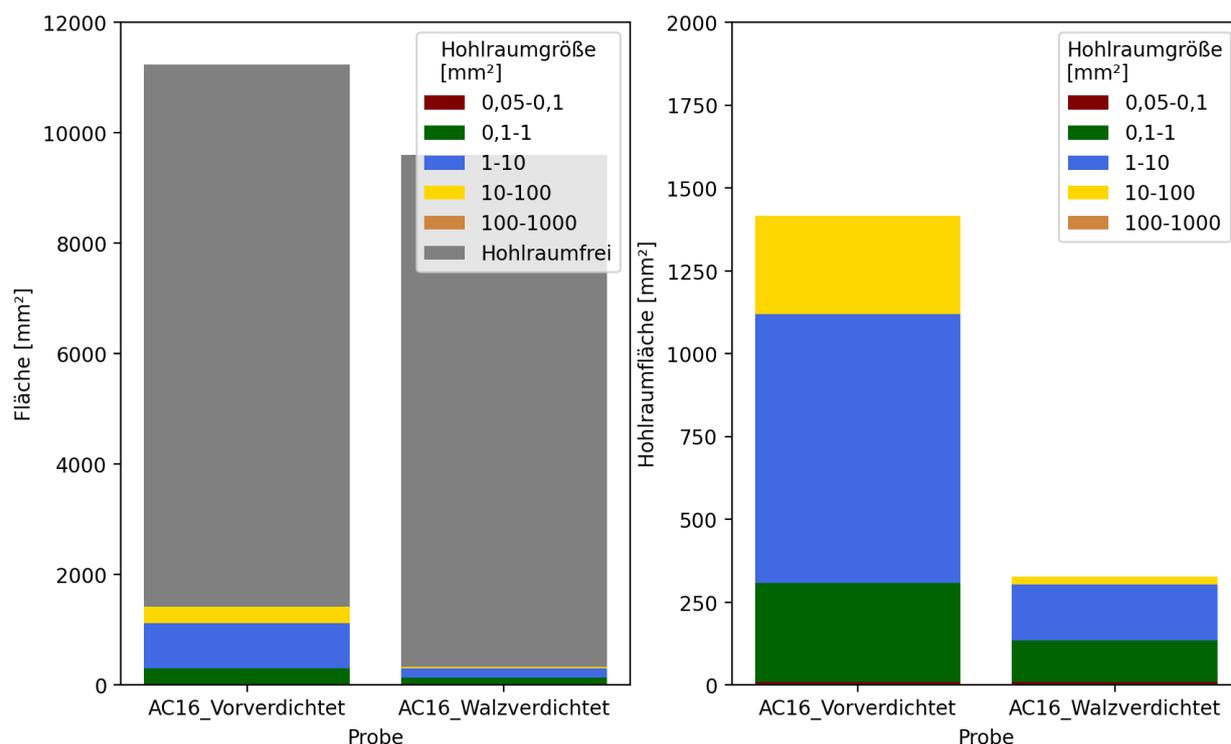


Abbildung 35: Hohlraumgrößenverteilung eines AC 16 BS im vorverdichteten und im endverdichteten Zustand

2.5.4 Validierung der Methode anhand von Forschungsprojekten

Die entwickelte Methode der Asphaltpetrologie wurde zusätzlich zur beschriebenen Validierung bei verschiedenen Probekörpern zur Ermittlung von asphalttechnologisch relevanten Parametern eingesetzt. Diese konnten in mehreren Forschungsprojekten mit Parametern, die mit der konventionellen Methode ermittelt wurden, korreliert werden. Im Folgenden sollen die Ergebnisse dieser Validierung dargestellt werden. Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Verlauf der jeweils vorgestellten Projekte erzielt und waren nicht Bestandteil des hier geförderten Projekts. Sie dienen lediglich der Validierung der Methode in der Praxis.

2.5.4.1 Anwendung der Methode im Forschungsprojekt FE 88.0159/2017 der BASf

Im Rahmen des Forschungsvorhabens Robot-Straßenbau 4.0 (FE: 88.0159/2017) wurde die Asphaltpetrologie eingesetzt, um den Einfluss der Vor- und Endverdichtung auf die Hohlraumstruktur zu analysieren und zu bewerten.

Hierzu wurden zwei Teststrecken in Bad Hersfeld mit einer Binderschicht AC 16 BS und Limburg mit einer Tragdeckschicht AC 16 TD hergestellt (siehe Abbildung 36). Diese wurden jeweils nur

halbseitig mit Walzen endverdichtet, um einen Vergleich zwischen der Hohlraumverteilung im vorverdichteten (VV) und endverdichteten (EV) Zustand zu ermöglichen.

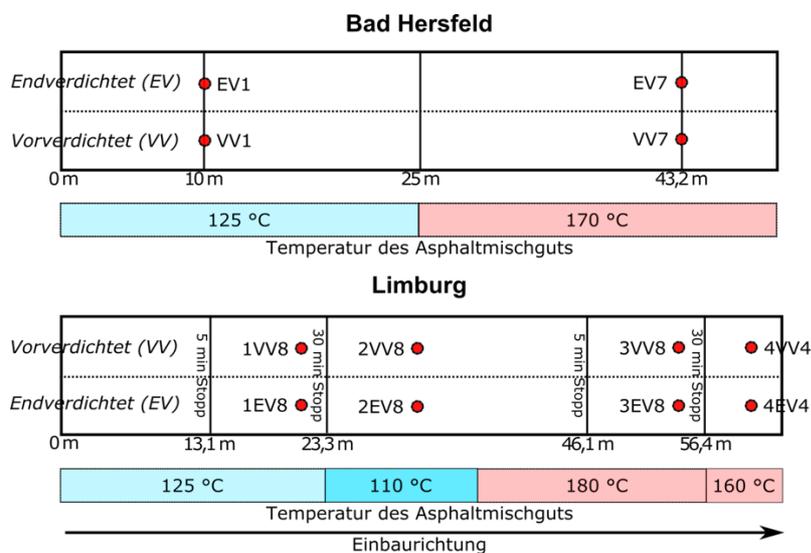


Abbildung 36: Bohrkerntnahmestellen der beiden Probeeinbauten. Zusätzlich sind die Mischguttemperatur und für Limburg die Fertigerstillstände gekennzeichnet.

Zunächst wurden die Hohlraumklassen vergleichend analysiert. In der Abbildung 37 wird die Verteilung der Hohlräume in die Klassen: Sehr klein $\leq 0,1$ mm, klein 0,1 - 1 mm, mittel 1 - 10 mm, groß 10 - 100 mm und sehr groß > 100 mm dargestellt. Als Beispiel wird jeweils ein Bohrkernpaar aus Bad Hersfeld, sowie eines aus Limburg betrachtet.

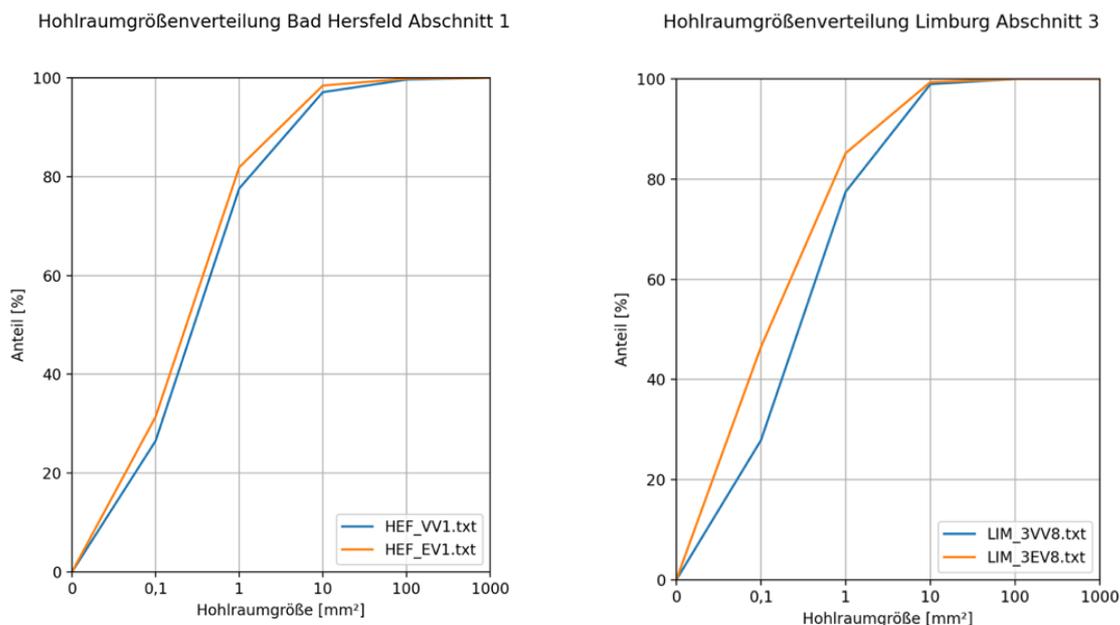


Abbildung 37: Verschiebung der Hohlraumgrößenverteilung zwischen Vor- und Endverdichteter Schicht

Bei beiden Proben ist erkennbar, dass sich der Anteil der sehr kleinen Hohlräume an der Gesamtzahl der Hohlraumobjekte bei der Walzverdichtung erhöht, wobei der Effekt bei der Probe aus Limburg deutlicher ausgeprägt ist. Bei den Bohrkernen aus Bad Hersfeld ist sowohl in der vorverdichteten, als auch in der endverdichteten Schicht der Großteil der Hohlräume im kleinen Bereich zu finden, wohingegen in Limburg bei der Endverdichtung ein fast gleicher Anteil von sehr kleinen und kleinen Hohlräumen erreicht wird. Dies ist vermutlich auf die unterschiedlichen Mischgutsorten zurückzuführen.

Wie in Abbildung 38 dargestellt, kann auch die Lage der Hohlräume zur Beschreibung einer Asphaltsschicht beitragen. Die dort gewählte Darstellungsweise liefert gute Informationen zu lokalen Anreicherungen von Hohlräumen im Anschliff, ist jedoch wenig geeignet um generelle Trends abzubilden, wie z. B. Verschiebungen der Hohlraumverteilungen in einen bestimmten Tiefenbereich, oder die Gleichmäßigkeit der Hohlraumverteilung. Um diese Punkte besser ansprechen zu können, wurde der prozentuale Hohlraumanteil pro Pixelzeile über die Tiefe aufsummiert.

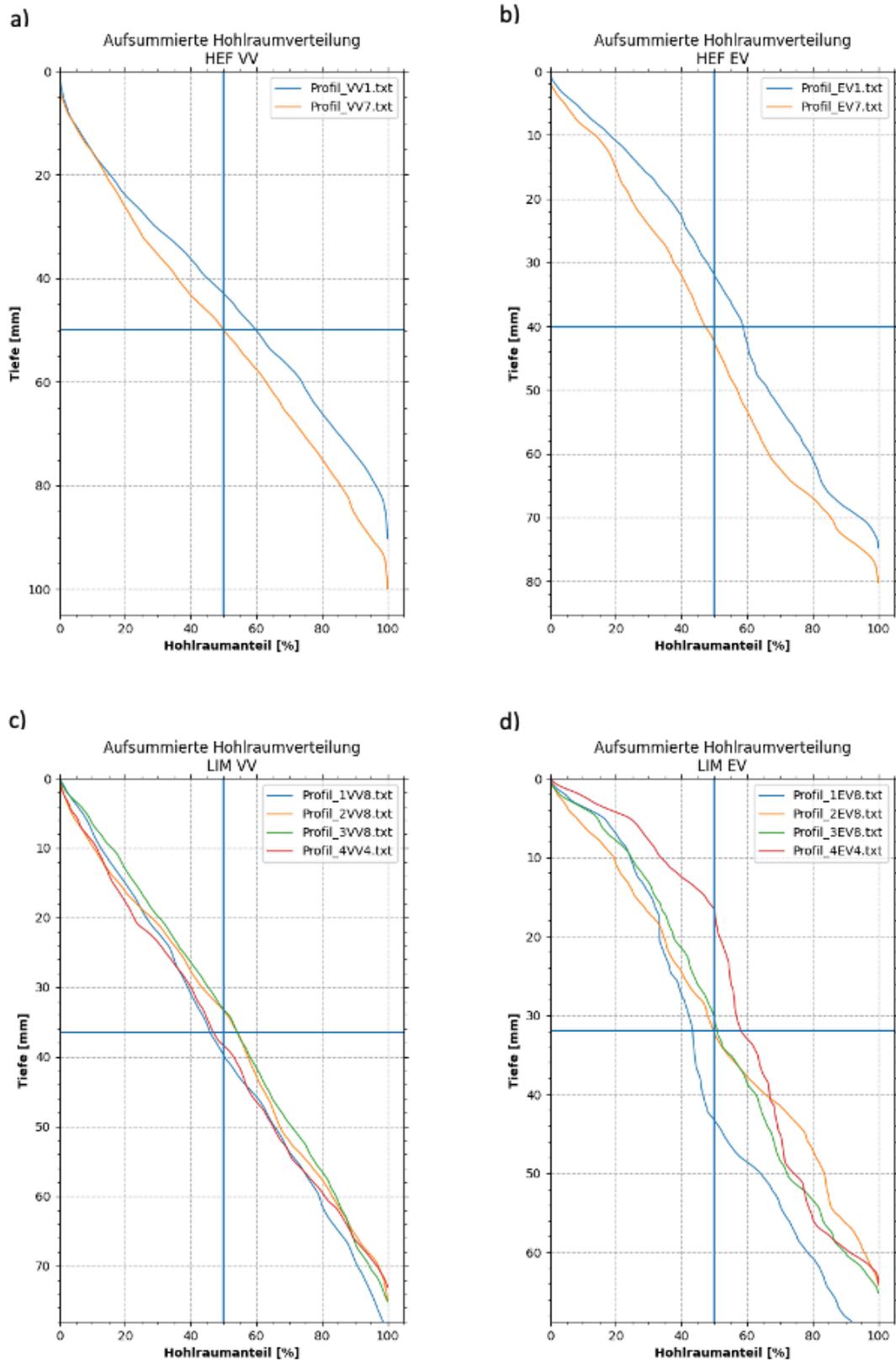


Abbildung 38: Aufsummierte Tiefenverteilung des Hohlräumgehalts für Bad Hersfeld (a und b) und Limburg (c und d) jeweils im vorverdichteten (VV) und endverdichteten (EV) Zustand

Es ist offensichtlich, dass der Walzeneinsatz bei dem Asphaltmischgut für die Asphaltbinder-schicht in Bad Hersfeld einen geringeren Einfluss auf die Hohlraumverteilung hatte als beim Trag-deckschichtmischgut in Limburg. Aufgrund des höheren Anteils an feiner Gesteinskörnung im AC 16 TD ist dies einleuchtend. Insbesondere in den Abbildungen c und d (vgl. Abbildung 38) zeigt sich ein weiterer Einfluss des Walzens. Nach dem Fertigerreinbau ist die Verteilung der Hohlräume über die Tiefe nahezu ideal gleichmäßig. Nach der Endverdichtung streut die Verteilung zwischen den Bohrkernen deutlich mehr, zudem ist sie auch innerhalb der einzelnen Proben deutlich inho-mogener. (Di Turi & Harries, 2022)

2.5.4.2 Anwendung der Methode zur Überprüfung des Schichtenverbundes

Böhm et al. (2021) untersuchten mit Hilfe der Methode den Schichtenverbund zwischen zwei As-phaltschichten bei Einsatz des Sprühfertigers. Hierzu wurde visuell die Schichtgrenze für den Ein-satz verschiedener Bitumenemulsionen mit dem Sprühfertiger untersucht. Da der Sprühfertiger verschiedene Ansprühpositionen (a-c) nutzt, wurde die Schichtgrenze zusätzlich je Ansprühposi-tion betrachtet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 zu sehen. Es ist für die Emulsion C 40 B5-S ersichtlich, dass sich an Position b) die meisten Hohlräume an der Schichtgrenze bilden. Diese Position ist diejenige mit der kürzesten Brechzeit für die Emulsion und deutet daher auf Wassereinschluss hin, welcher zu Hohlräumen an der Schicht-grenze führt. Werden die beiden Abbildungen verglichen, lässt sich schließen, dass sich bei der Emulsion C 60 BP4-S insgesamt weniger Hohlräume bilden.

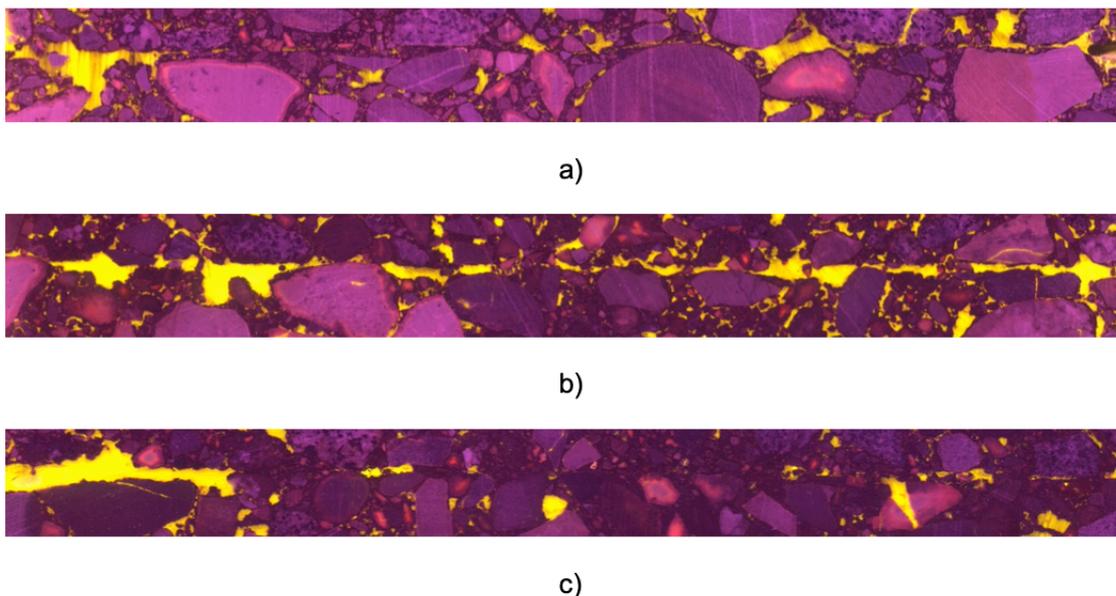
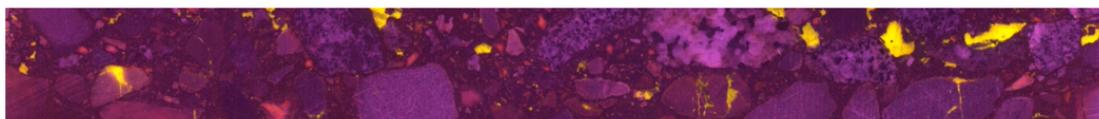
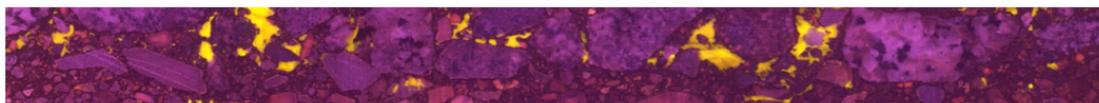


Abbildung 39: Schichtgrenzen verschiedener Ansprühpositionen mit der Emulsionen C40 B5-S



a)



b)



c)

Abbildung 40: Schichtgrenzen verschiedener Ansprühpositionen mit der Emulsionen C60 BP4-S

Die Hohlraumverteilung lässt bei der Emulsion C 40 B5-S auf geringere Scherkräfte als bei der Emulsion C60 BP4-S schließen. Diese Vermutung konnte mit dem Abscherversuch nach Leutner bestätigt werden. (Böhm et al., 2021)

2.5.4.3 Anwendung der Methode im Forschungsprojekt ZF4153713HF8 ZIM-AiF

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Wirksamkeit einer porösen Zwischenschicht für Flächenheizungen unter Verkehrsflächen“ (ZF41531713HF8) (HEIZ) des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM), AiF Projekt GmbH wurde die entwickelte Methode zur Bestimmung der Permeabilität von Asphalten genutzt.

Eine wichtige Eigenschaft von porösen Zwischenschichten aus Asphalt ist deren Permeabilität. Dieser Wert legt fest, wie schnell durchströmendes Wasser durch die Asphaltsschicht gelangt. Da im Projekt die durch die Sonnenenergie aufgenommene Wärmemenge an das durchströmende Wasser abgegeben bzw. im Winter wärmeres Wasser Wärme an die umgebende kalte Asphaltsschicht abgegeben werden soll, ist die Geschwindigkeit des durchströmenden Wassers von entscheidender Bedeutung.

Daher wurden verschiedene Asphaltzusammensetzungen im Asphaltmischwerk des beteiligten mittelständischen Unternehmens gemischt, daraus Probekörper hergestellt und diese auf Permeabilität untersucht. Dies geschah mit dem klassischen vertikalen Durchflussversuch nach TP Asphalt-StB – Teil 19 und parallel dazu mit der asphaltpetrologischen Hohlraumanalyse. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Folgenden dargestellt.

Von den sechs untersuchten Mischgütern wurde die beschriebene asphaltpetrologische Methode durchgeführt. Die Bilder der Probekörper sind im Folgenden zu sehen:



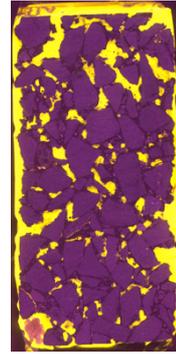
*Abbildung 41: HEIZ,
Probekörper 1.1*



*Abbildung 42: HEIZ,
Probekörper 1.2*



*Abbildung 43: HEIZ,
Probekörper 1.3*



*Abbildung 44: HEIZ,
Probekörper 2.1*



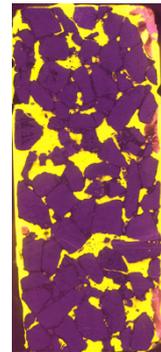
*Abbildung 45: HEIZ,
Probekörper 2.2*



*Abbildung 46: HEIZ,
Probekörper 2.3*



*Abbildung 47: HEIZ,
Probekörper 3.1*



*Abbildung 48: HEIZ,
Probekörper 3.2*



Abbildung 49: HEIZ,
Probekörper 4.1



Abbildung 50: HEIZ,
Probekörper 4.2

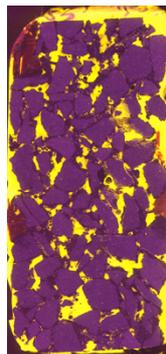


Abbildung 51: HEIZ,
Probekörper 4.3

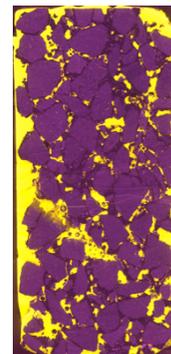


Abbildung 52: HEIZ,
Probekörper 5.1



Abbildung 53: HEIZ,
Probekörper 5.2

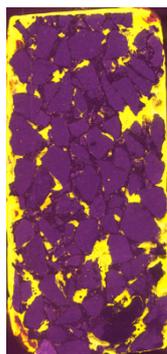


Abbildung 54: HEIZ,
Probekörper 5.3

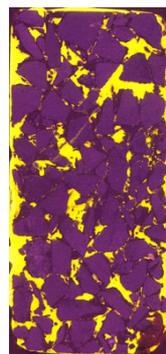


Abbildung 55: HEIZ,
Probekörper 6.1

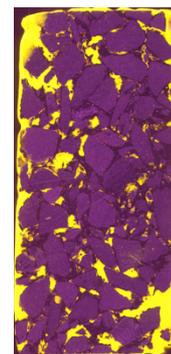


Abbildung 56: HEIZ,
Probekörper 6.2

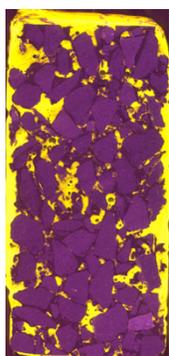


Abbildung 57: HEIZ,
Probekörper 6.3

Anschließend wurden konventionelle Durchflussmessungen nach TP Asphalt-StB – Teil 19 an sechs unterschiedlich modifizierten Asphaltproben vorgenommen. Die Durchflussmessungen haben dabei signifikant unterschiedliche Permeabilitäten ergeben. Diese konnten allerdings nicht erfolgreich mit den konventionellen Volumen-hohlraumgehalten korreliert werden. Im ersten Schritt wurden daher die Flächenhohlräume die sich aus den asphaltpetrologischen Anschliffen ergeben in die Hohlraumklassen A bis F eingeteilt (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Einteilung der ermittelten Flächenhohlräume in Hohlraumklassen

Klasse	Von [mm ²]	Bis [mm ²]
A	0,05	0,1
B	0,1	1
C	1	10
D	10	50
E	50	100
F	100	1000

Anschließend wurden die Flächenhohlräume der einzelnen Hohlraumklassen durch nachstehende Gleichung mit der ermittelten Permeabilität verknüpft. Dabei konnten hohe Korrelationskoeffizienten festgestellt werden. Außerdem hat sich gezeigt, dass eine Abnahme der kleinen Hohlraumklassen zu einer Zunahme der großen Hohlraumklassen und somit zu einer Zunahme der Permeabilität führt.

$$FR(VC) = \beta_1 + \beta_2 \cdot VC$$

FR = Permeabilität [mm/s]

VC = Hohlraumgehalt [%]

β_1, β_2 = Regressionskonstante [-]

Eine kombinierte Betrachtung der ermittelten Hohlräume innerhalb der Hohlraumklassen mit einer multiplen Regression anhand nachstehender Gleichung erbringt einen Korrelationskoeffizient von über 98 %. Aufgrund des geringen Anteils an Hohlräumen der Hohlraumklasse A wurde diese bei der Berechnung vernachlässigt.

$$FR(VC) = \beta_1 \cdot VC_B + \beta_2 \cdot VC_C + \beta_3 \cdot VC_D + \beta_4 \cdot VC_E + \beta_5 \cdot VC_F$$

Da die Veröffentlichung der Ergebnisse noch aussteht, wird von einer genauen Beschreibung hier abgesehen. (Böhm et al., 2022)

2.5.4.4 Anwendung bei Schadensanalysen

Die Methode der asphaltpetrologischen Hohlraumanalyse war im Projektzeitraum und ist auch noch bis heute immer wieder Teil von asphalttechnologischen Untersuchungen, die das Institut für verschiedene Auftraggeber durchgeführt hat. Der Blick in das Gefüge der Asphaltprobekörper erbringt Hinweise auf die Ursache bei Schadensanalysen, die aus herkömmlichen Untersuchungen nicht abzuleiten sind.

2.5.5 Schlussfolgerung

Die Software JMicroVision erlaubt eine Auswertung von Asphaltanschliffen mit geringer Einarbeitung, da sie eine leicht verständliche Benutzeroberfläche hat und mit einer kurzen Einführung leicht zu bedienen ist. Im Laufe des Forschungsprojekts wurden große Fortschritte in der Visualisierung von Hohlraumdaten gemacht. Anhand der Präparation von Proben verschiedener Asphaltmischgutzusammensetzungen konnte gezeigt werden, dass die Methode auf alle üblichen Asphaltbefestigungen angewendet werden kann. Die Gegenüberstellung der bildanalytisch ermittelten Hohlraumgehalte zu konventionell bestimmten Werten zeigt eine gute Übereinstimmung, wenn auch bei großen Hohlraumgehalten und großen Hohlraumobjekten die Schwankung in der Bildanalyse größer ist. Eine Mittelung über mehrere Anschliffe ist daher nötig.

2.5.6 Gegenüberstellung der geleisteten Arbeiten mit den Projektzielen

Ziel des Arbeitspakets war es einen Algorithmus zu entwickeln, der automatisiert Hohlräume in Asphaltanschliffen detektieren und auswerten kann. Da in der Erprobungsphase eine Software gefunden wurde, die diese Funktionen bietet, wurde der Fokus auf die Optimierung des Auswerteprozesses, sowie auf die Weiterverarbeitung der erzeugten Daten gelegt. Es konnte gezeigt werden, dass auch von KMUs eine Auswertung von asphaltpetrologischen Proben möglich und die Methode somit in der Praxis anwendbar ist. Die Ziele des Arbeitspakets wurden daher erfüllt.

3 Verwendung der Zuwendung

Von der genehmigten Zuwendung in Höhe von 173.670,00 € wurden durch das Institut für Verkehrswegebau der TU Darmstadt 142.879,62 € verwendet. Hierbei handelt es sich um Personalkosten in Höhe von 118.732,12 €, Ausgaben für Leistungen Dritter in Höhe 1.487,50 € und um die Pauschale für sonstige Ausgaben von 22.660,00 €.

Die Differenz zwischen abgerufenen und genehmigten Mitteln erklärt sich wie folgt: Im Laufe des Projektes wurde festgestellt, dass einige Fremdleistungen Dritter für den Abschluss des Projektes nicht benötigt werden und die Projektergebnisse hauptsächlich ohne Fremdleistungen Dritter

erreicht werden konnten. Daher wurden die nicht benötigten Gelder für diese Leistungen Anfang 2022 zurücküberwiesen.

Die Personalkosten wurden benötigt, um die Methode der asphaltpetrologischen Hohlraumermittlung zu entwickeln und zu validieren. Die Ausgaben für Fremdleistungen Dritter wurden für Bohrkernentnahmen benötigt, die das Institut für Verkehrswegebau nicht selbst durchführen kann. Die Pausche für sonstige Ausgaben wurde hauptsächlich für Beschaffung von Labormaterialien und die Beschaffung weiterer Verbrauchsmittel verwendet.

Eine Übersicht über die Verwendung der Zuwendung ist im zahlenmäßigen Nachweis detailliert aufgelistet.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

Die Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse ist dem zusätzlich beigefügten Dokument „Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse und des Ergebnistransfers in die Wirtschaft durch den Zuwendungsempfänger“.

6 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ort/Veranstaltung	Datum
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	Treffen an der TU Darmstadt	12.06.2019
		25.11.2019
		08.06.2020
		12.11.2020
		29.04.2021
Treffen der internationalen Gesellschaft für Asphaltpetrologie, Vorstellung der aktuellen Forschungsergebnisse	Mitgliederversammlung mit Erfahrungsaustausch an der TU Darmstadt	05.11.2019 16.07.2021

▪ Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ort/Veranstaltung	Datum
Wissenschaftliche Veröffentlichungen	verschiedene nationale und internationale Fachzeitschriften	Teils erfolgt, weitere nach Projektende
Verbreitung der Methode auf Kongressen, Fortbildungen, Tagungen, etc...	Verschiedene nationale und internationale Veranstaltungen	Nach Projektende

▪ Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Ansprache interessierter Unternehmen	Bekanntmachung der neuen Analysemethoden; Transfer in die Praxis und weitere Präzisierung der relevanten Fragestellungen im Dialog mit Nutzern; Workshop für Laboranten zum Erlernen der Präparationstechniken	Unterschiedliche Veranstaltungen (Tagungen, Seminare, Infoveranstaltungen, Workshops)	Nach Projektende
Wissenschaftliche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften	Vorstellung der gewonnenen Erkenntnisse und der praktischen Verwertbarkeit	- asphalt (DE) - Journal of materials in civil engineering (ASCE, USA)	Nach Projektende
Internet-Veröffentlichungen	Vorstellung der gewonnenen Erkenntnisse und der praktischen Verwertbarkeit	- Homepage des DAV - Homepage der Int. Gesellschaft für Asphaltpetrologie e.V.	Nach Projektende
Transfermaßnahmen bei Konferenzen, Tagungen, Seminaren, Infoveranstaltungen	Vorstellung der gewonnenen Erkenntnisse und der praktischen Verwertbarkeit	- Deutscher Straßen- und Verkehrskongress - FGSV Asphaltstraßentagung - DAV/DAI weiterbildendes Studium mit Zertifikat - Seminar „Schlechte Straßen gut gebaut“	Nach Projektende

Akademische Ausbildung	Ergründung des Materialverhaltens durch die neuen Analysemethoden und Vermittlung der Erkenntnisse in der Lehre	<ul style="list-style-type: none">- Vorlesungen + Übungen- Studentische Arbeiten	Nach Projektende
Schlussbericht und Präparationsanleitung	Bereitstellung eines ausreichend umfangreichen Projektabschlussberichtes auf dessen Basis die konzipierten Verfahren in der Praxis erprobt werden können	<ul style="list-style-type: none">- Veröffentlichung im Internet	Nach Projektende

7 Quellenverzeichnis

- Böhm, S., Middendorf, M., & Flottmann, N. (2021). Einbau von Walzasphalt unter Verwendung eines Sprühfertigers. *Straße und Autobahn*, 72(10), 843–848.
- Böhm, S., Schütz, M., Middendorf, M., Harries, L., Helfmann, S. & Kempf, D. (2022). *Wirksamkeit einer porösen Zwischenschicht für Flächenheizungen unter Verkehrsflächen* [Schlussbericht (noch nicht veröffentlicht)]. Technische Universität Darmstadt.
- Di Turi, T., & Harries, L. (2022). Untersuchung zum Wirkmechanismus der Walzverdichtung mittels bildanalytischer Verfahren und hochauflösenden Oberflächenvermessungen. *Straße und Autobahn*, 2022(01), 22–29.
- FGSV. (2012). *Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 8: Volumetrische Kennwerte von Asphaltprobekörpern und Verdichtungsgrad (Ausgabe 2012)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- Hughes, C. S. (1989). *Compaction of asphalt pavement* (Bd. 152). National Cooperative Highway Research Program.
- Ma, T., Zhang, Y., Zhang, D., Yan, J., & Ye, Q. (2016). Influences by air voids on fatigue life of asphalt mixture based on discrete element method. *Construction and Building Materials*, 126, 785–799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.045>
- Renken, P. (1980). *Verdichtbarkeit von Asphaltbetongemischen und ihr Einfluss auf die Standfestigkeit* (Schriftenreihe Lehrstuhl für Straßenwesen und Erdbau). Technische Universität Braunschweig.
- Roduit, N. (2020). *JMicro Vision: Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images*. <https://jmicrovision.github.io>
- Tielmann, M. R. D., & Hill, T. J. (2018). Air Void Analyses on Asphalt Specimens Using Plane Section Preparation and Image Analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018189. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002422](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002422)
- Tielmann-Unger, M. R. D. (2019). *Verbesserte Bestimmung der Hohlraumverteilung von Asphaltprobekörpern*. Technische Universität Darmstadt.

8 Anhang

8.1 Präparationsanleitung



1. Bohrkern sägen

Vorbereitende Arbeiten



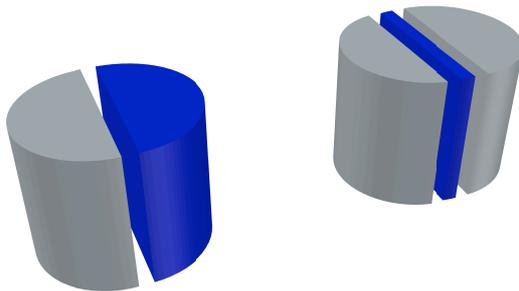
Zunächst muss die spätere Schnittfläche des BKs mit einem wasserfesten Schreibgerät markiert werden.

Sofern im BK Risse vorhanden oder die BK

sehr offenporig sind, ist es sinnvoll, diese vor dem Schneiden zu imprägnieren.



Sollen bereits geschnittene oder instabile BK geschnitten werden, sollte aufgrund der geringen Pressfläche der Säge ein Keil angepresst werden (z.B. schnellreaktives Kunstharz-Sand-Gemisch, welches abwechselnd geschichtet wird).



Es existieren je nach Anforderung zwei Arten, wie der BK geschnitten werden kann:

- BK mittig durchschneiden
- Scheibe aus BK ausschneiden (hierfür muss zuvor ein Überstand abgesägt werden)

Sägeeinstellungen



Trennkraft >7 Ampere

Vorschubrate: 500-1000 $\mu\text{m/s}$ (abhängig von gewünschter Schnittqualität \rightarrow je geringer die Vorschubrate, desto sauberer ist der Schnitt)

Umdrehungen: 800 U/Min.

Taktvorschub ist für verwendetes Material ungeeignet

Darüber hinaus gibt es unterschiedliche Arten von Verfahrenswegen

- Diagonalschnitt (gleichzeitiges Verfahren in y- und z-Richtung, geeignet für große Probekörper)
y ist die Länge, die erwartet wird, um den BK durchsägen zu können
z ist die Schnitttiefe, also Durchmesser des BK zzgl. Zugabe
 \rightarrow y- und z-Werte nach Schätzungen sowie Erfahrungswerten wählen
 \rightarrow es hat sich als sinnvoll erwiesen, zunächst einen geringen horizontalen Vorschub zu wählen (Schnitt überwiegend vertikal) und erst kurz vor Erreichen der geplanten Schnitttiefe den vollen horizontalen Vorschub einzustellen (Schnitt überwiegend horizontal). Dadurch wird gewährleistet, dass alle Eckbereiche von der Trennscheibe erfasst werden.
- Horizontal-(y-)Schnitt (geeignet für lange, dünne Probekörper)
- Vertikal-(z-)Schnitt (geeignet für kurze, dicke Probekörper)

Beachte: solange y und z noch nicht in die Endposition gefahren sind, lassen sich die Einstellungen der geschätzten y- und z-Werte während des Sägebetriebs umstellen

WICHTIG: Während des Sägevorgangs ist unbedingt darauf zu achten, dass der Probekörper nicht an die Welle gelangt, da dies die Säge beschädigen kann.

Sägen des PK



Nachfolgende Erläuterungen beziehen sich auf ein praktisches Beispiel, bei dem eine Scheibe längs aus einem Bohrkern herausgetrennt werden soll.

Als Verfahrenmodus wurde der Diagonalschnitt gewählt.

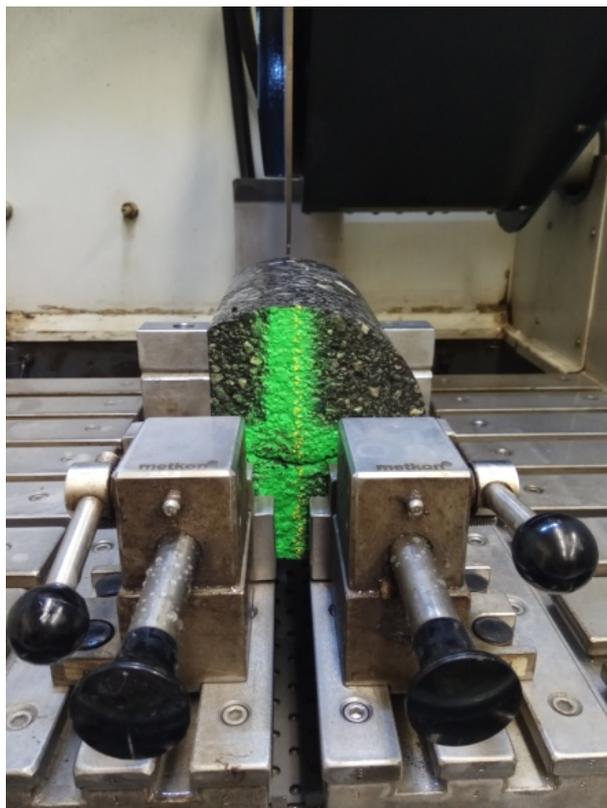
Der BK muss in die Pressflächen der Säge so eingespannt werden, dass zunächst der Überstand abgesägt werden kann.

Der Bohrkern muss derart eingespannt werden, dass ein Verrücken oder Rollen unmöglich ist. Dies darf jedoch nicht durch hohen Druck auf die Hebel erzielt werden (**Beschädigungsgefahr!**). In Problemfällen müssen die Spannflächen begradigt werden.



Ist der BK eingespannt und das Sägegehäuse geschlossen, kann die Wasserzufuhr gestartet werden. Das Kühlwasser muss auf die Randbereiche der Trennscheibe ausgerichtet sein.

Nun kann das Starten der Säge erfolgen, wobei der Sägefortschritt stets beobachtet werden muss, um ggfs. den y- und z-Vorschub anzupassen.



Sobald der BK durchgeschnitten ist, ist die Säge anzuhalten, der abgeschnittene Überstand aus der Säge herauszunehmen und der geschnittenen BK neu in den Pressflächen entsprechend der vorher markierten Schnittfläche zu positionieren. Für den erneuten Sägevorgang sind die Schritte 2 und 3 zu wiederholen.

Reinigung und Trocknung PK



Als erstes muss der geschnittene PK gewaschen werden, um Verschmutzungen aus dem Trennvorgang zu entfernen.



Nach dem Waschen ist der PK vorsichtig mit einer Druckluftpistole vorzutrocknen.



Für den eigentlichen Trocknungsprozess muss der PK eben gelagert werden (mit der zu untersuchenden Seite nach unten), um Verformungen während des Trocknungsprozesses zu vermeiden. Ggfs. muss eine Auflast aufgebracht werden. Die Trocknungsdauer des PKs liegt bei ca. einem Tag.

Reinigen der Säge



Nach jeder Benutzung ist die Säge zu reinigen.

Vor dem eigentlichen Reinigungsprozess ist der Füllstand des Kühlwasserbehälters zu überprüfen.



Die Säge soll in die Ausgangsposition zurückgefahren werden und mit Frischwasser (Flachstrahl) von oben nach unten gereinigt werden.

Beachte: die nachgefüllte Säuberungsmenge darf nicht größer sein als die verdunstete Menge des Wasser-Sägeflüssigkeits-Gemisches im Kühlwasserbehälter, da sonst der Behälter überläuft.



Um die Säge vor Korrosion zu schützen, muss diese nach dem Nassreinigen mit Druckluft getrocknet werden, wobei ein besonderes Augenmerk auf stehendes Wasser in Rillen und Schraubenköpfen gelegt werden soll.



In regelmäßigen Zeitabständen (nicht nach jedem Sägevorgang) müssen die beweglichen Teile besonders gründlich gereinigt und gefettet werden. Hierzu wird die Fettpresse an die dafür vorgesehenen Nippel angelegt und das Fett so lange eingepresst, bis es an entsprechender Stelle wieder austritt. (Einige Nippel sind schwer einsehbar! Auch hinter der Wartungsklappe rechts hinten befinden sich Nippel!)

Die Gleitrohre und Spindeln der Verfahrachsen

sind manuell zu schmieren.

2. PK mit Epoxidharz verfüllen

Vorbereiten des PK



Zum Abdichten des PK nach unten wird selbstklebende Bucheinbindefolie verwendet.

Die Folie sollte so geschnitten werden, dass am Rand ein Überstand existiert, der ein Auslaufen des später einzufüllenden Harzes verhindert.

Die zugeschnittene Folie wird an der Rückseite des PKs aufgebracht und entlang der Außenseiten eng einschlagen.

Beachte: Sämtliche verwendete Folien oder Kunststoffformen, die unmittelbar mit dem Epoxidharz in Berührung kommen können, sollten aus Polypropylen (PP) bestehen, da sich dieses sehr einfach vom erhärteten Epoxidharz lösen lässt.



Darüber hinaus ist es sinnvoll, den Rand mit Isolierband zu verstärken, sodass ein eventuelles Ablösen der Folie verhindert wird. Um außerdem die einzufüllende Harzmenge gering zu halten, sollte das Isolierband möglichst enganliegend am PK befestigt werden.



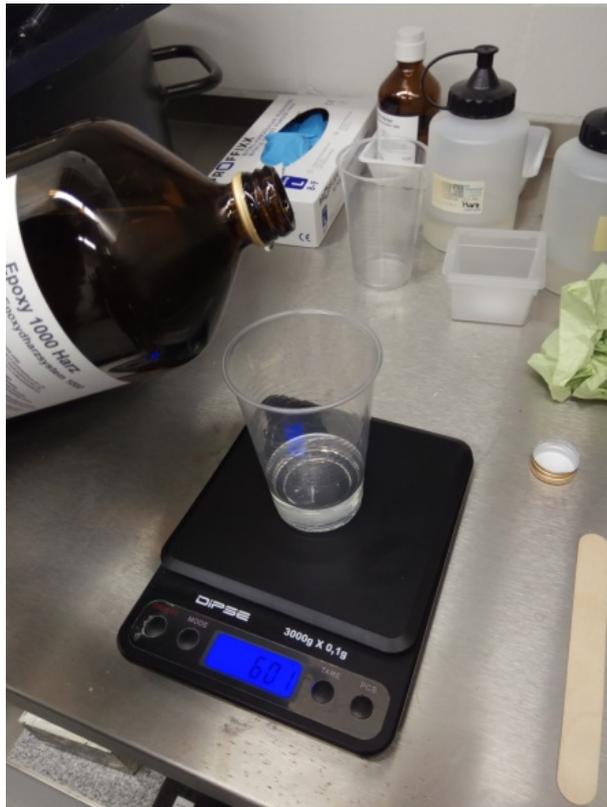
Die Abmessungen der PK-Oberfläche sollen minimal verkleinert auf eine stabile Folie (z.B. OHP-Folie) übertragen und ausgeschnitten werden. Die Ecken der Folie sind abgerundet auszuscheiden.

Diese Abdeckfolie soll an späterer Stelle für eine glatte Oberfläche des imprägnierten PKs sorgen.

Epoxidharzgemisch herstellen

Vor dem Herstellen ist unbedingt die persönliche Schutzausrüstung (PSA) anzulegen, welche aus einer Schutzbrille, Staubmaske und Handschuhen besteht.

Für die Herstellung des Epoxidharzgemisches muss die erforderliche Harzmenge in Abhängigkeit vom Volumen des PKs, des geschätzten Hohlraumgehalts, ggfs. vorhandener Risse sowie des Überstandes geschätzt werden.



Die Einwaage besteht aus einem 2-Komponenten-Gemisch sowie Pigment

- Zunächst Komponente A (langsam erhärtendes Epoxidharz mit niedriger Aushärtetemperatur, z.B. Epoxy 1000 der Firma Cloeren) einwiegen.
- 2-3 M-% eines fluoreszierenden Pigments (Beschaffungsfirma des Pigments z.B. <http://www.uv-elements.de/>) hinzugeben und mit einem Holzspatel oder Plastiklöffel verrühren, bis sich das Pigment vollständig und klumpenfrei aufgelöst hat.

Alternativ ist es auch möglich nicht-fluoreszierendes Pigment zu verwenden.

Allerdings ist hierbei der Kontrast nicht so hoch, was die spätere optische Auswertung erschwert. Darüber hinaus können bestimmte Farbbereiche im Gestein vorhanden sein, welche eine Abgrenzung zum



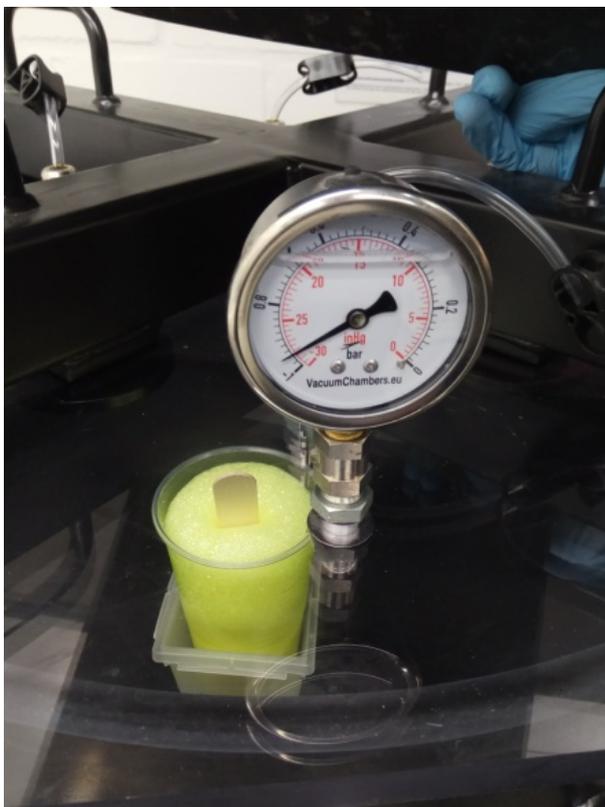
Hohlraum in der optischen Auswertung erschweren.

- Komponente B (Härter) im richtigen Mischungsverhältnis hinzugeben (siehe Behälter) und gut verrühren.

WICHTIG:

zum Schutz unbedingt eine Staubmaske tragen.

außerdem ist das Tragen von Handschuhen (siehe Bild) und Schutzbrille erforderlich.



Das Gemisch muss nun in der Vakuumkammer entlüftet werden, wobei ein Druck von mindestens -970 mbar aufgebaut werden muss.

Tipp: Damit überhaupt ein Unterdruck aufgebaut werden kann, muss der Deckel zu Beginn der Entlüftung manuell angepresst werden.

Unter Umständen ist es sinnvoll, den Druck mehrmals zu reduzieren, um eine spontane



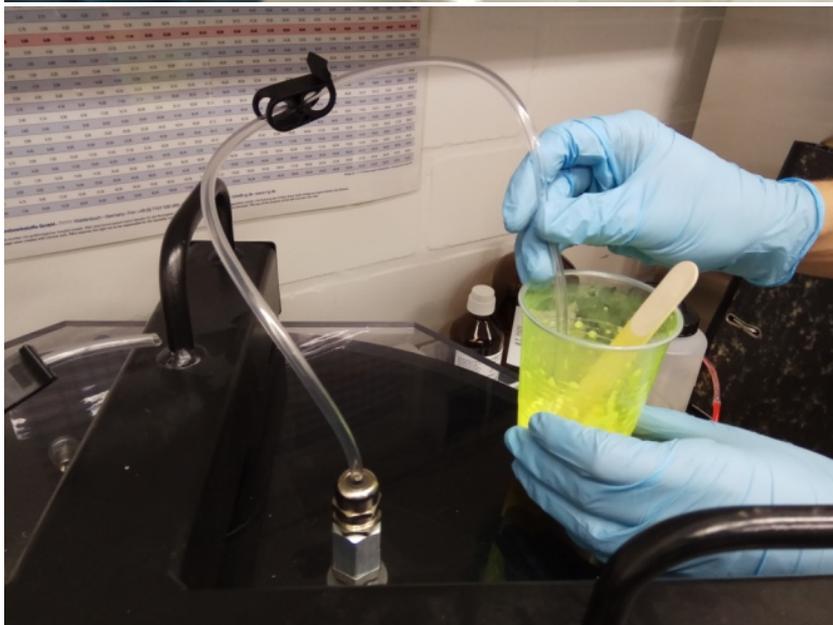
Implosion der Luftblasen anzuregen.

Die Entlüftung ist abgeschlossen, wenn keine Neubildung von Luftblasen mehr stattfindet und nur noch wenig Schaum auf der Harzmasse steht.

Um beim Druckablassen ein Umfallen des Gefäßes zu verhindern, sollte dieses in ein stabilisierendes Behältnis gestellt werden.

Präparieren des PKs mit Epoxidharz

Vorab wird der präparierte PK in PP-Gefäß gelegt, um einem Verschmutzen der Vakuumkammer entgegen zu wirken.



Das Epoxidharz kann auf zwei Arten in den präparierten PK eingefüllt werden.

Die erste Möglichkeit besteht darin, das entlüftete Harz auf der PK-Oberfläche aufzutragen und zu verteilen.

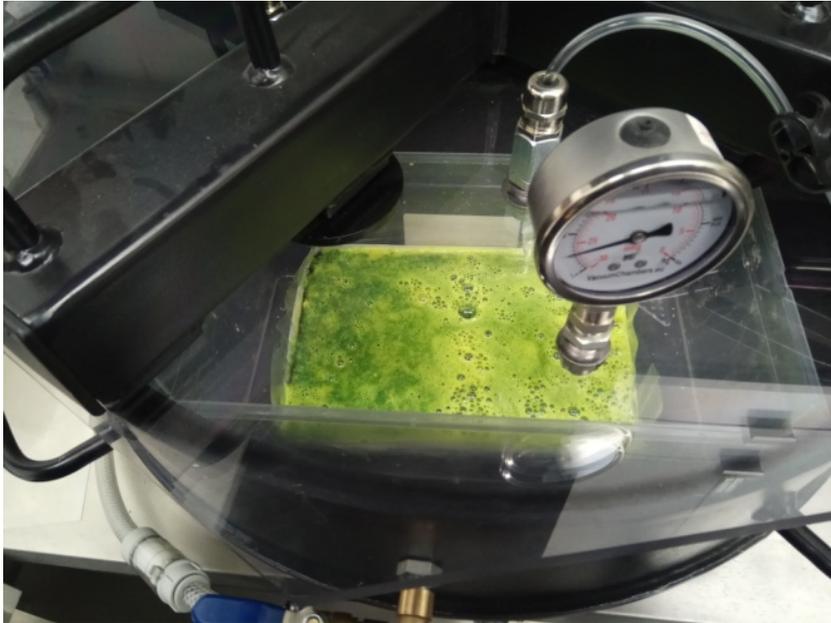
Für spezielle Fragestellungen:

Eine aufwendigere Möglichkeit ist es, das Harz über eine Schlauchzufuhr an der Vakuumkammer dosiert auf den PK zu platzieren. Ein Problem, das hierbei auftreten kann ist, dass der Schlauch Luft zieht, falls die Epoxidharzmenge falsch geschätzt wurde.

Beachte: Das entlüftete Epoxidharz hat eine begrenzte Verarbeitungsdauer und muss deswegen zeitnah in den PK eingebracht werden. Außerdem soll beim Einfüllen auf einen ausreichenden Harzüberstand an Stellen mit erhöhtem Hohlraumgehalt geachtet werden.

Imprägnation in der Vakuumkammer

Der mit Epoxidharz bedeckte PK kann nun in die Vakuumkammer überführt werden. Bei diesem Entlüftungsvorgang ist es ebenfalls erforderlich einen Druck von -970 mbar aufzubringen. Ggfs. ist auch hier ein regelmäßiges Entlüften notwendig.

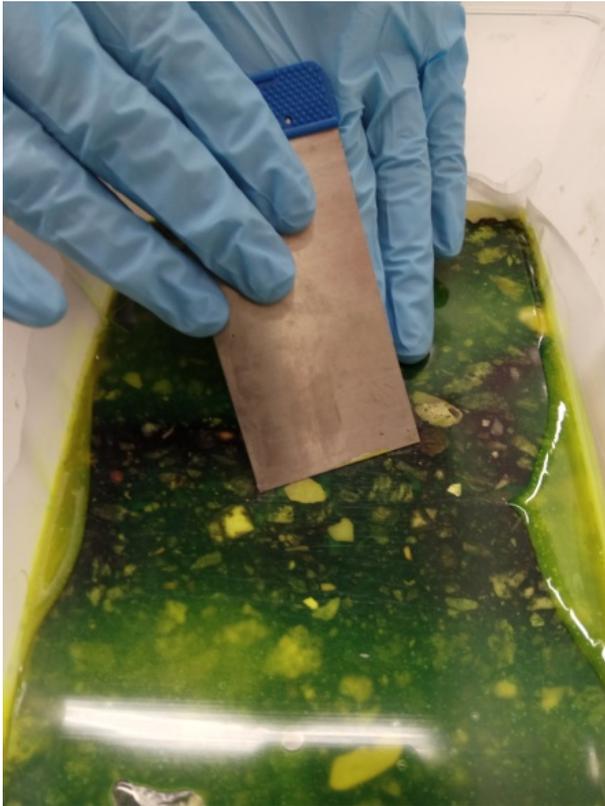


Sobald der Druck von -970 mbar erreicht ist, sollte der PK kurz darin beharren, bevor der Druck wieder vollständig abgelassen wird.

Der Vorgang ist mehrmals zu wiederholen, bis keine Neubildung von Blasen mehr stattfindet.

Wurde der Druck vollständig abgelassen, kann der PK der Vakuumkammer entnommen werden.

Nacharbeiten



Jetzt wird die zuvor zugeschnittene stabile Folie aufgebracht. Mit einem Spachtel wird die Folie so lange glatt gestrichen, bis möglichst alle Luftblasen unter der Folie verschwunden sind. Falls in diesem Vorgang nicht alle Luftblasen entfernt werden, können diese – wie an späterer Stelle beschrieben wird – im Nachgang verfüllt werden. Die Aushärungszeit des Epoxidharzes beträgt einen Tag.

3. PK Schleifen

Entfernen sämtlicher Folien



Nachdem das Epoxidharz vollständig ausgehärtet ist, kann der PK aus der Box entnommen werden.



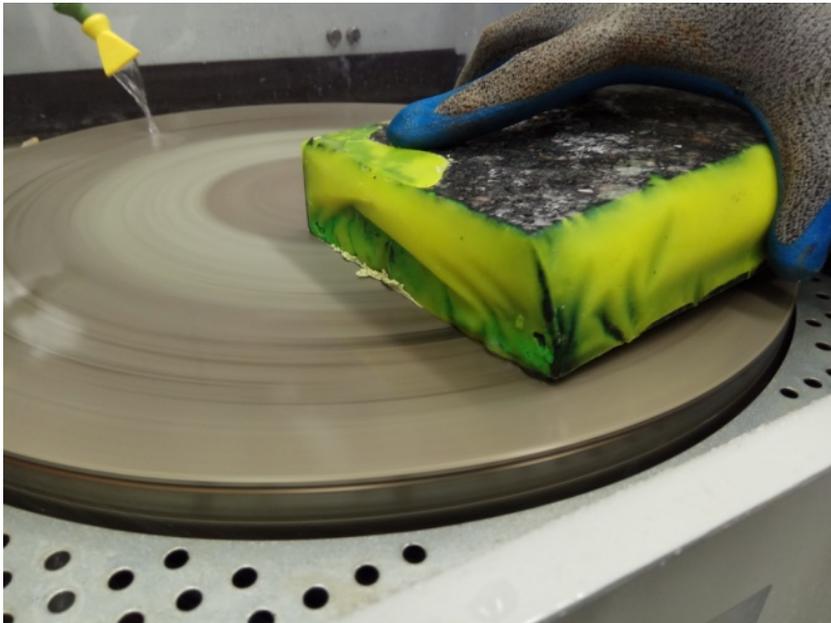
Nun kann der PK sowohl von dem Isolierband als auch der Bucheinbindefolie vorsichtig befreit werden.

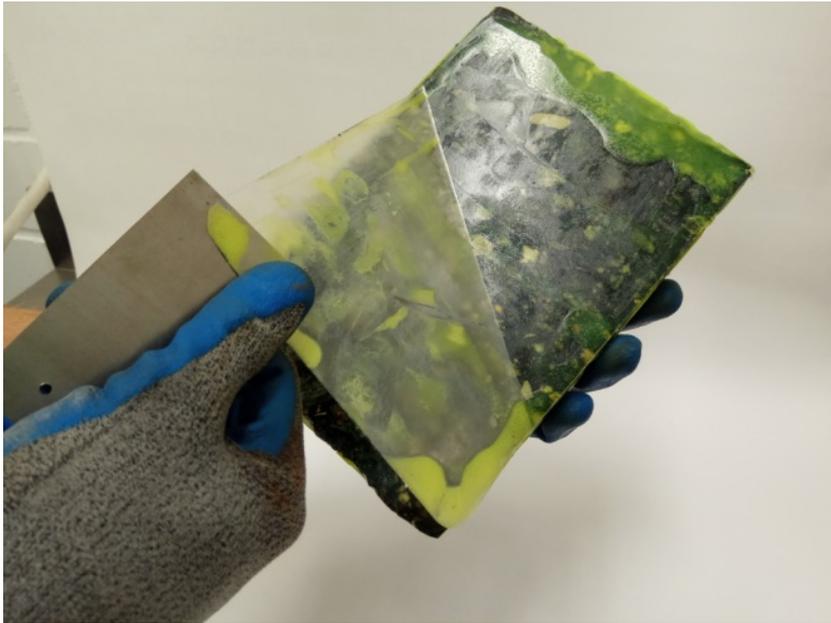


Dabei empfiehlt es sich **Schnittschutzhandschuhe** zu tragen, da das überstehende Epoxidharz häufig **scharfkantig** ist.



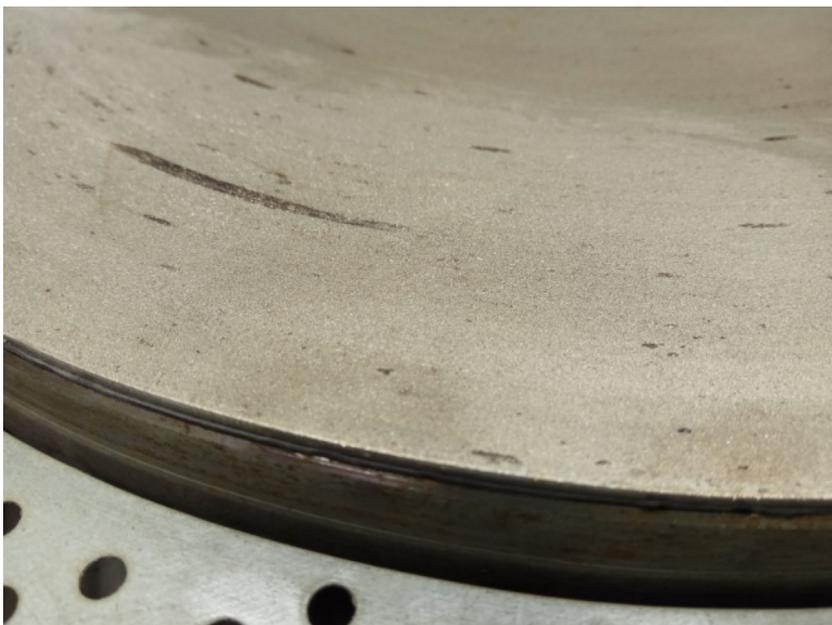
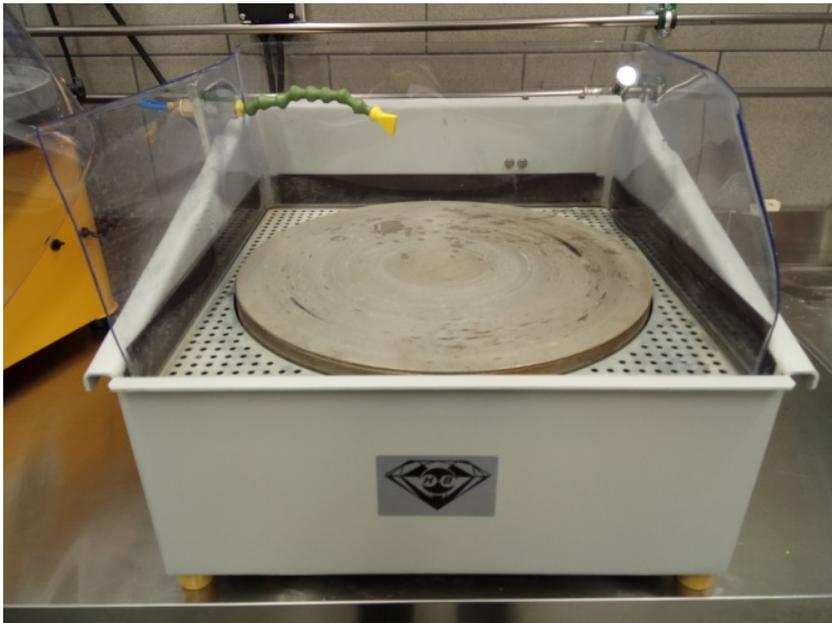
Große Überstände sowie scharfe Kanten sind zu entfernen, um das Verletzungsrisiko zu reduzieren. Dies kann z.B. durch Schleifen erfolgen.





Jetzt kann die Folie an der Oberfläche (am besten von einer Ecke ausgehend) abgezogen werden.

Unprofilierte Schleifscheibe



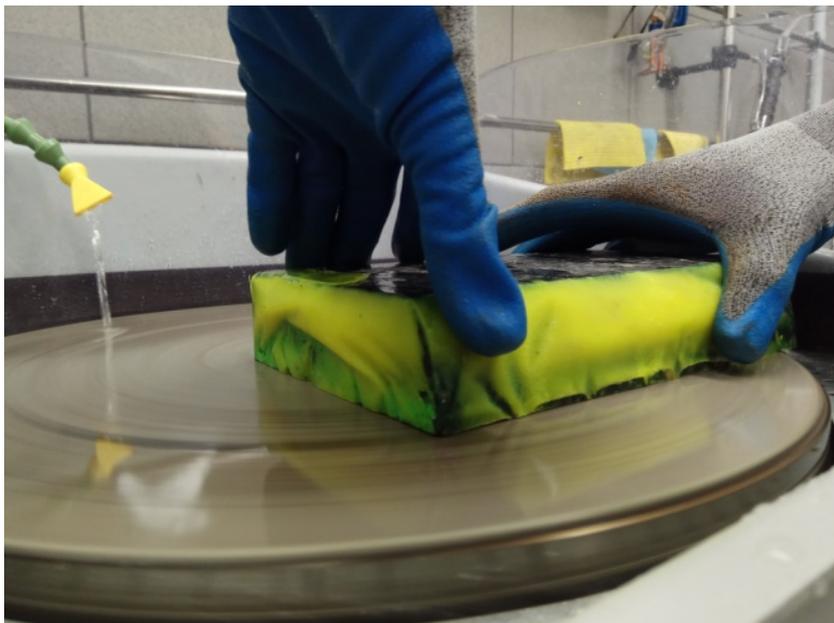
Für den ersten Grobschliff ist zunächst eine unprofilierte Schleifscheibe zu verwenden

WICHTIG:

- **die Schleifscheibe muss bündig auf dem Drehteller aufliegen, damit an den Rändern keine Überstände entstehen, siehe Bild links**
- **zum Schutz unbedingt die bereitliegenden Schnittschutzhandschuhe tragen**
- **die Scheibe muss permanent mit Wasser gekühlt werden.**

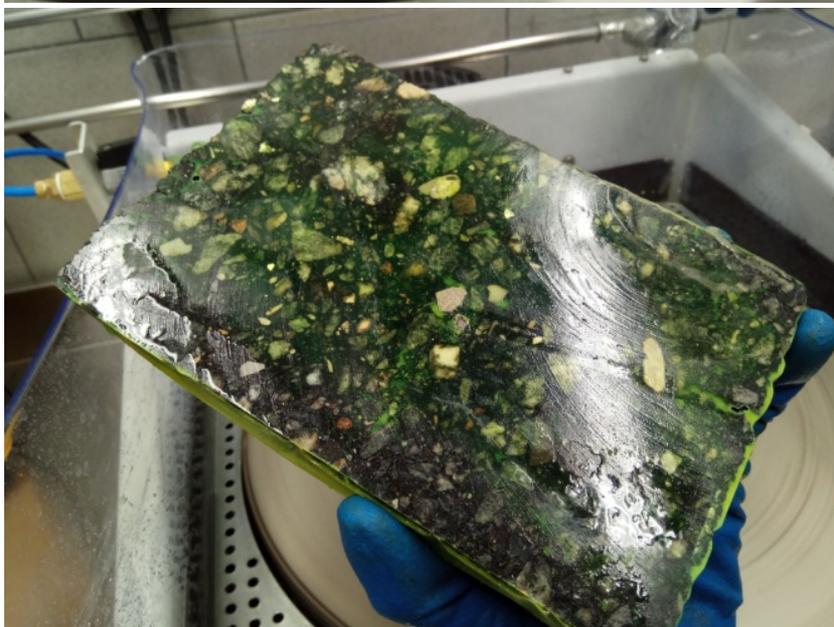
Vorsicht im Umgang mit der Scheibe: der PK kann sich an der Scheibe festsaugen und umhergeschleudert werden! Die Gefahr des Ansaugens wird verringert, indem nicht die vollständige Oberfläche auf die Scheibe gelegt wird.

Sollte der Probekörper aus der Hand rutschen nehmen Sie die Hände aus dem Gefahrenbereich und schalten Sie

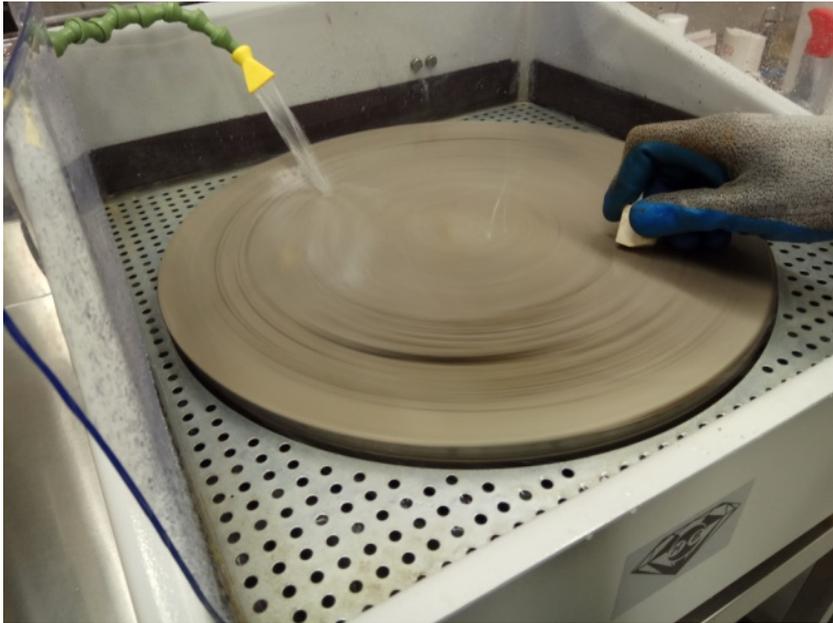


die Maschine ab. Versuchen Sie nicht den Probekörper mit den Händen einzufangen.

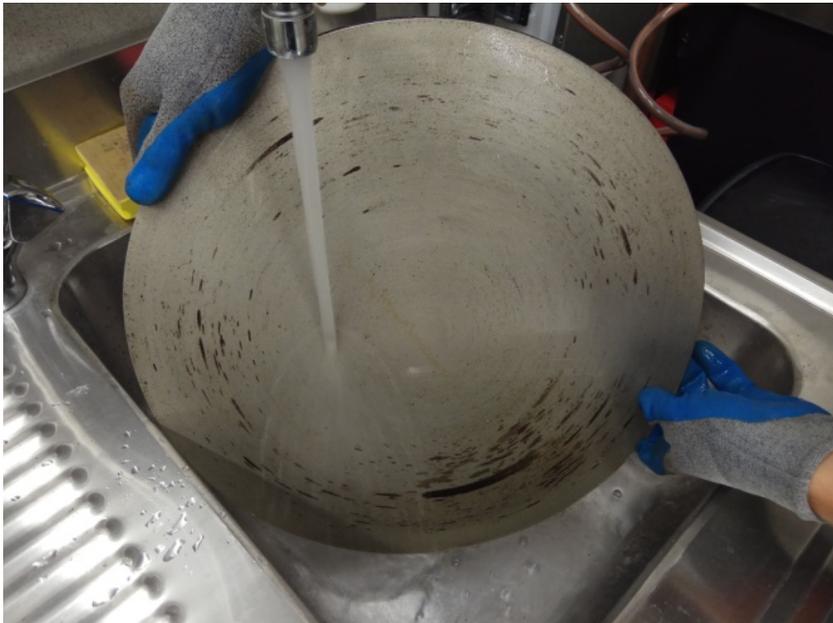
Die Scheibe hinterlässt zudem deutliche Riefen auf der PK-Oberfläche, wenn sich abgelöste Körner darauf befinden. Dies kann durch ausreichende Wasserzufuhr und niedrige Anpressdrücke geringfügig reduziert werden.



Aufgrund der beschriebenen Problematik wird für den folgenden Feinschliff eine profilierte Schleifscheibe mit geringerer Abtragsleistung benutzt..

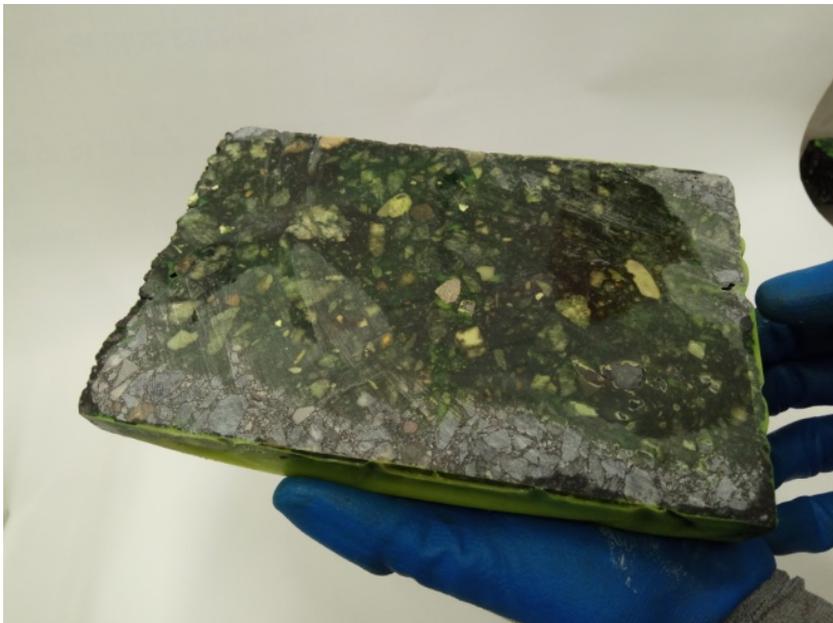


Sobald alle großen Harzüberstände abgeschliffen sind, muss die Schleifscheibe nass gereinigt werden. Dies erfolgt an der rotierenden Scheibe unter Zuhilfenahme eines Abziehsteins, der eventuelle Bitumenrückstände entfernt und den Diamantbesatz anschräfft. Anschließend muss die Scheibe unter laufendem Wasser abgespült und mit Druckluft getrocknet werden.



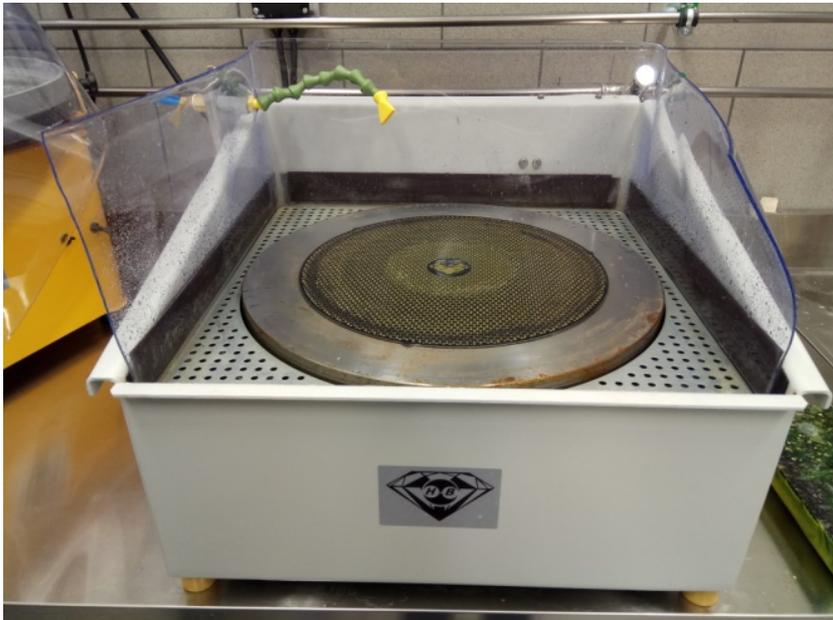
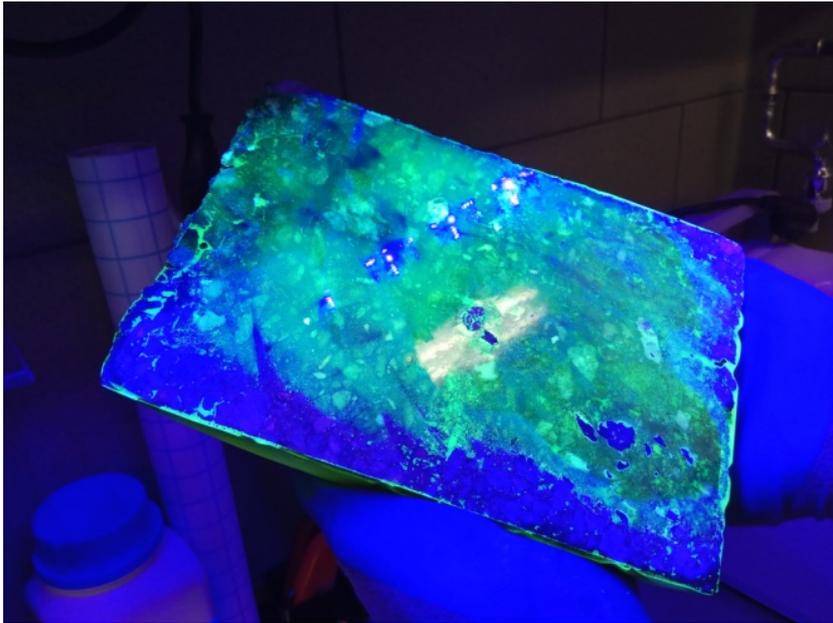


Profilierte Schleifscheibe



Nun erfolgt der Feinschliff mit der profilierten Schleifscheibe. Hierbei gilt zu beachten, dass dieser Schleifvorgang insgesamt eine längere Schleifdauer in Anspruch nimmt, sich jedoch der PK aufgrund der Profilierung nicht an der Scheibe festsaugt und keine Riefenbildung stattfindet.

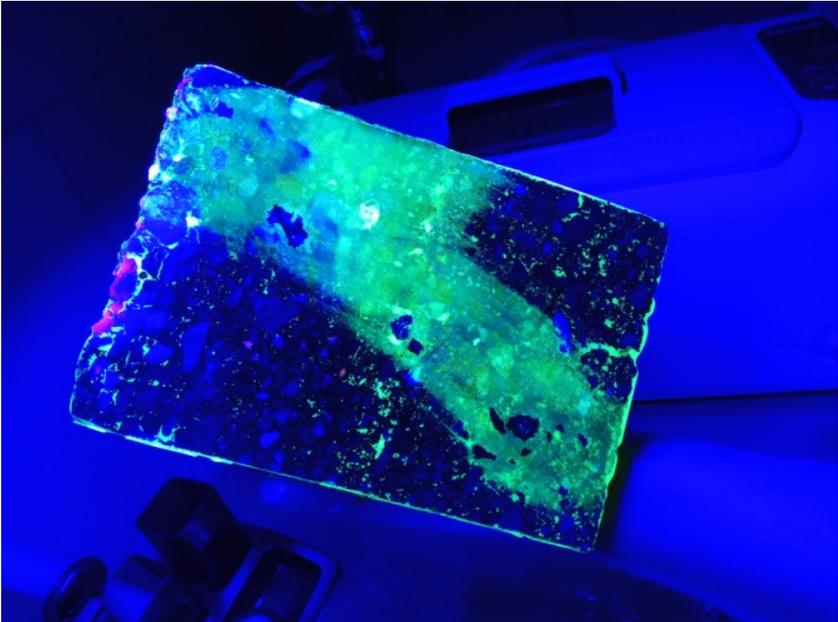
Während des Schleifprozesses soll der PK in regelmäßigen Abständen unter UV-Licht angesehen werden, um den Schleiffortschritt zu überprüfen. So kann besser unterschieden

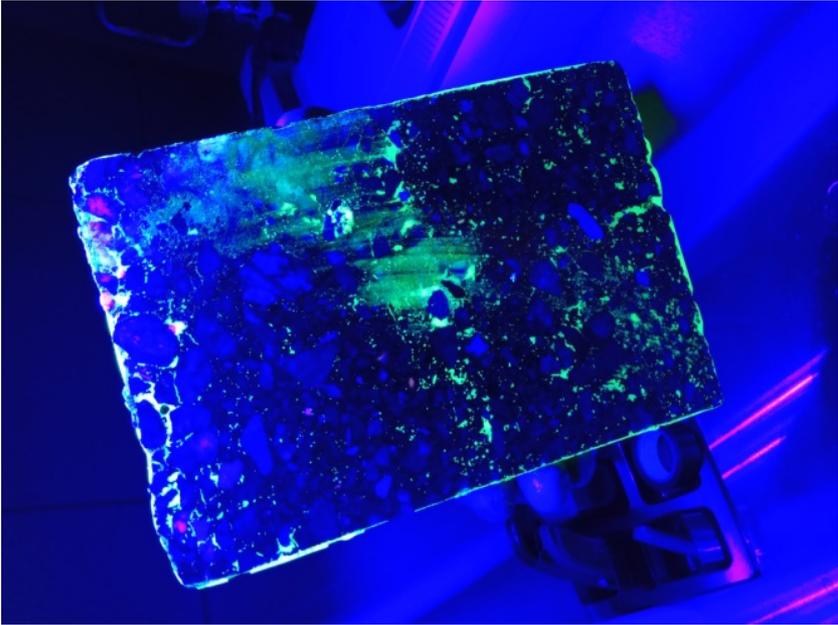
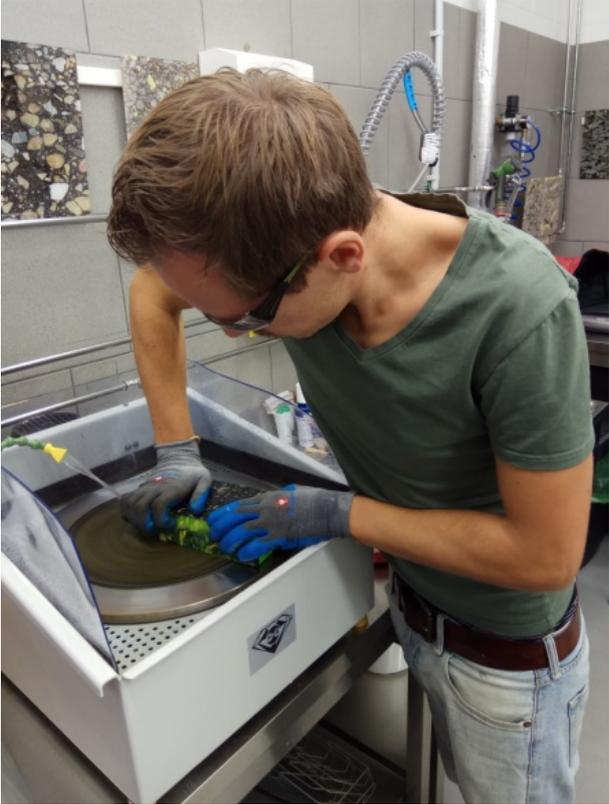


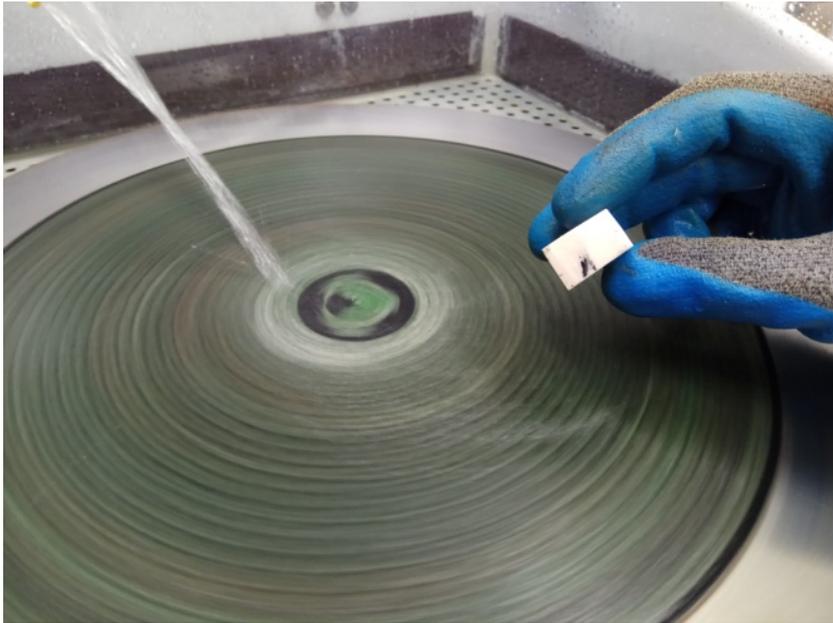
werden, welche Stellen noch zu bearbeiten sind und an welchen Stellen man eventuell bereits das Gestein schleift.

Wichtig:

- **zum Schutz unbedingt eine dafür vorgesehene Schutzbrille tragen**
- Ein großer Anpressdruck sollte unbedingt vermieden werden, da möglicherweise lokale Bindemittelverschmierungen auftreten können. Stellenweise darf (nach gewonnener Erfahrung) dosiert etwas Kraft aufgebracht werden, wenn dies dazu führt, dass die Qualität des Schleifprozesses nicht beeinträchtigt wird.
- Den PK stets in Bewegung halten.
- Falls der PK besonders zu Bindemittelverschmierungen neigt, sollte er zuvor eingefroren werden (-20 °C).

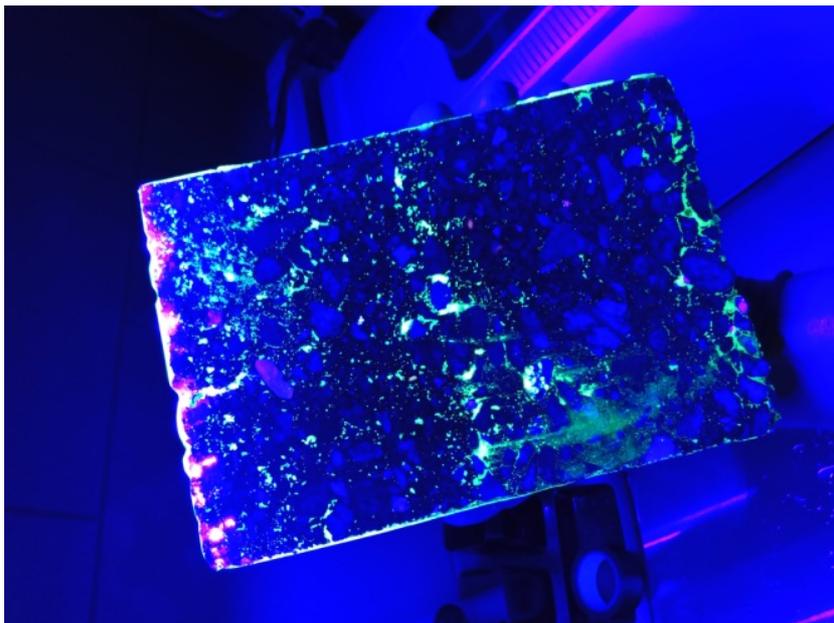




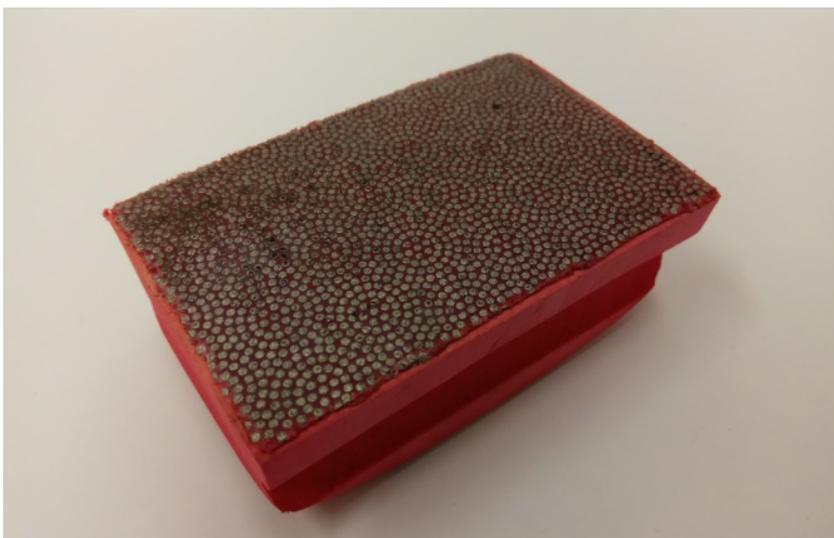


Ggfs. ist es notwendig eine feinere Scheibe zu verwenden. Die bisher verwendete Scheibe muss wie die zuvor verwendete unprofilierte Scheibe abgerichtet und gereinigt werden (siehe oben).





Nachschleifarbeiten mit einem Diamanthschleifklotz



Ausgewählte Bereiche, d.h. Bereiche, bei denen ein weiteres Schleifen mit der Schleifmaschine nicht mehr förderlich für den Schleifprozess ist, können von Hand mit einem Diamanthschleifklotz nachgeschliffen werden. Der Handschliff sollte ebenfalls unter fließendem Wasser stattfinden, wobei kreisförmige Bewegungen durchzuführen sind, um die bereits erwähnten Riefen zu vermeiden.

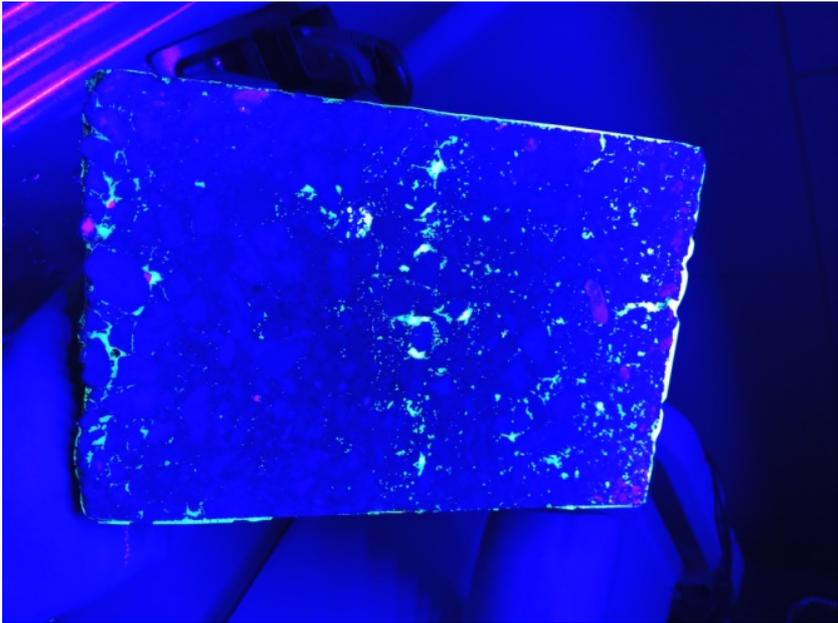


Trocknen des PK



Nun muss der PK getrocknet werden. Dies geschieht – wie bei den vorherigen Trocknungsprozessen – mit Druckluft. Im nassen Zustand besitzt der PK eine glänzende und kontrastreiche Oberfläche. Im trockenen Zustand wirkt die Oberfläche matt.





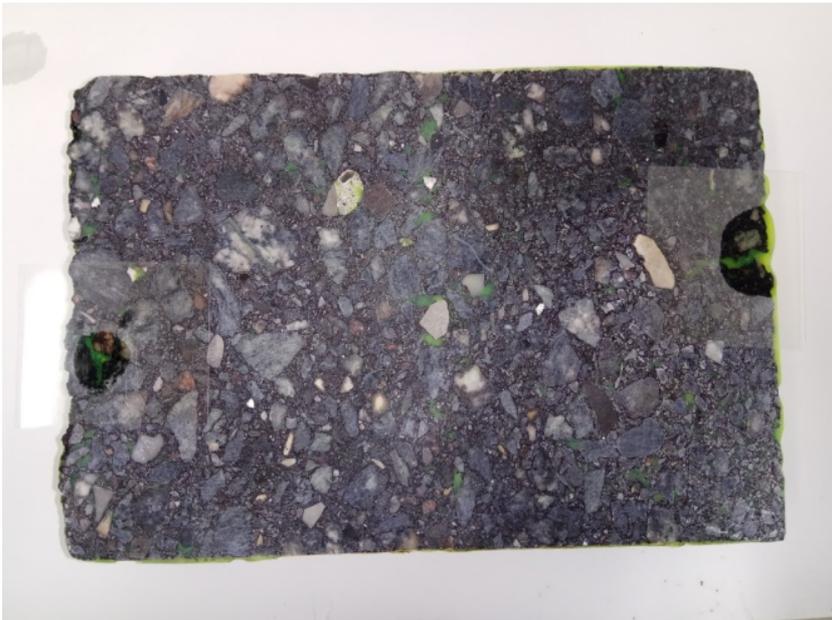
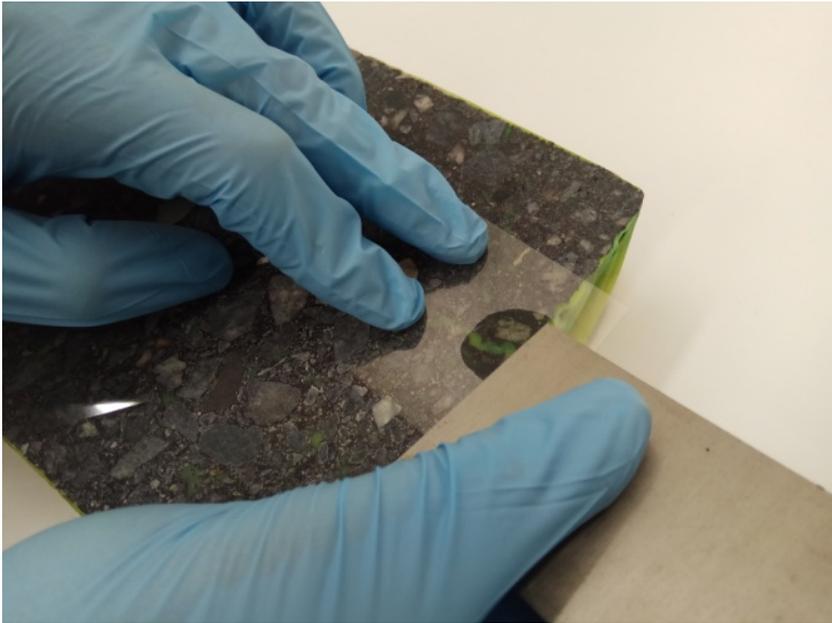
Nachträgliches Imprägnieren ggfs. vorhandener Löcher



Es kann erneut eine geringe Menge an Epoxidharz hergestellt werden, um Löcher zu verschließen. Die Herstellung geschieht analog zu der im zweiten Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise. Nachdem das Harz in der Vakuumkammer entlüftet wurde, kann eine handelsübliche Spritze verwendet werden, um das Harz in die Löcher zu spritzen. Die verfüllten Stellen sind ebenfalls mit Folie abzudecken (siehe Abschnitt 2) und abzuspachteln.







Sobald das Epoxidharz an den verfüllten Stellen getrocknet ist, kann an diesen Stellen die Folie abgezogen und mit dem Diamanthschleifklotz das Harz abgeschliffen werden. Der PK ist nun bereit zum Einscannen.

4. PK einscannen

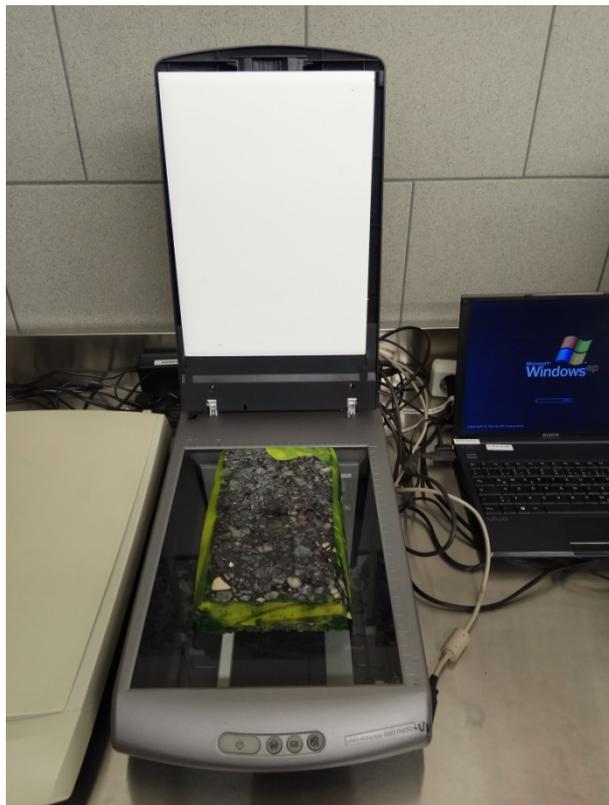
Scannereigenschaften



Im Labor stehen zwei Scanner, welche zu UV-Scannern umgebaut wurden.

Der HP-Scan-Jet funktioniert in Kombination mit dem dort stehenden Laptop.

Wichtig: das Netzteil der Scanner immer nur für die Dauer des eigentlichen Scanvorgangs anstecken, da die LEDs sehr schnell sehr heiß werden.



Scanvorgang



Im Folgenden wird die Methodik mit dem Epson-Scanner beschrieben.

Zum Einscannen wird die Software „Vorschau“ geöffnet. Unter dem Punkt „Ab-lage“ findet sich, wenn der Scanner korrekt verbunden ist, die Option „Importieren von...“. Im Anschluss öffnet sich der Scan-Dialog der Vorschau App.

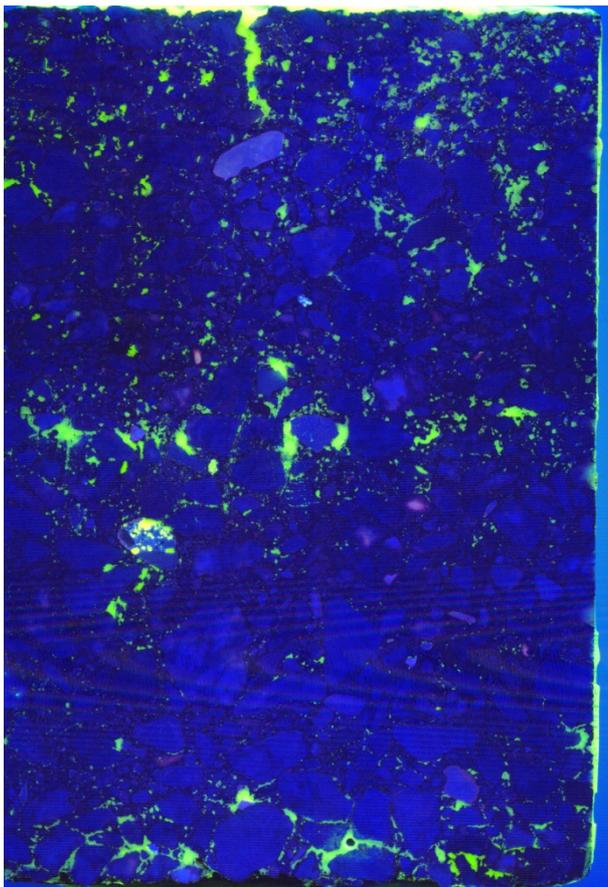
Im Übersichtsscan können per Drag and Drop Rahmen über den zu scannenden Bildausschnitt gelegt werden. Diese können auch rotiert werden, falls die Probekörper nicht ganz gerade ausgerichtet sind. Dies erleichtert die anschließende Auswertung.

Als Bildformat ist es empfehlenswert ein verlustfreies Format wie PNG oder TIFF zu wählen. Als Auflösung sind 1200 dpi für die meisten Zwecke gut geeignet.

Mit dem Klick auf „Scannen“ wird das Bild detailliert gescannt und kann danach auf dem Macbook gespeichert werden.

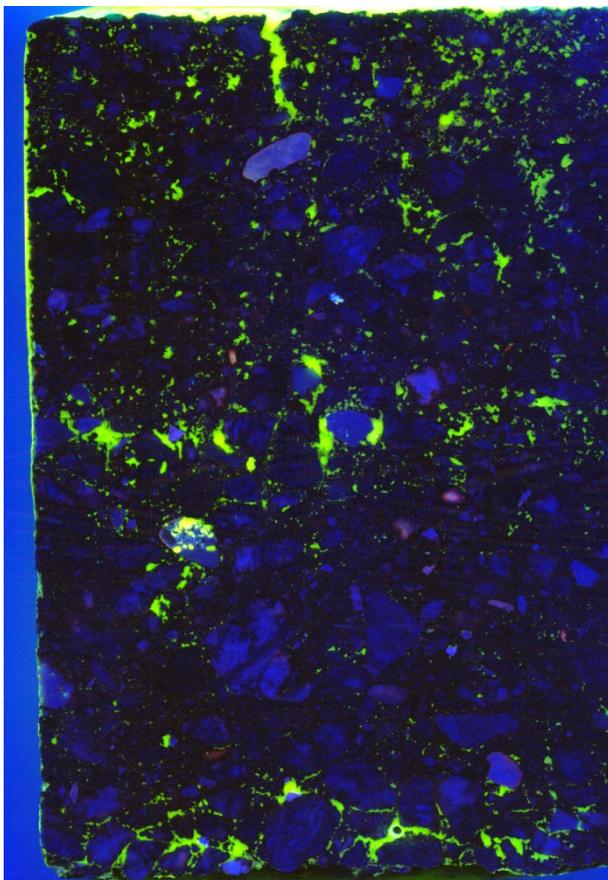
Hinweise:

- Streulicht beeinflusst die Scanqualität, weswegen der Scanner vor



dem Scanvorgang beispielsweise mit dunklem Stoff abgedeckt werden kann. In einem Raum ohne Fenster ist es ausreichend das Licht auszuschalten.

- Für einen schärferen Kontrast kann es hilfreich sein, den PK ganz fein mit Wasser zu besprühen und nebelfeucht abzuwischen (siehe zweiten Scan)



Allgemeine Hinweise:

- Die Glasfläche der Scanner muss sauber bleiben und darf nicht zerkratzt werden.
- Der einzuscannende PK darf nicht so schwer sein, dass die Glasplatte unter dessen Gewicht zu Bruch gehen könnte.